



**Dário M. Garcia**

Mestrado

# **Forno solar com lentes de Fresnel**

**e**

## **Aplicações em laser solar**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Física

Orientador: Dr. Dawei Liang, Prof Auxiliar

Júri:

Presidente: Dr. Orlando Teodoro, Prof Associado

Arguentes: Dr.a Ana Cristina, Prof Auxiliar



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Junho, 2013**



## **Forno solar com lentes de Fresnel e aplicações em laser solar**

Copyright® Dário Machado Garcia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

---

Ao Professor Doutor Dawei Liang, pela orientação científica, dedicação, total disponibilidade e em especial pela grande amizade que demonstrou ao longo de todo o tempo de realização do projeto. A convivência com ele foi extremamente enriquecedora não só ao nível científico mas também na vertente humana e interrelacional. Foi um privilégio conhecê-lo e trabalhar ao seu lado nestes meses.

À colega Joana Almeida pela ajuda, disponibilidade e todo o incentivo, compreensão e apoio demonstrado ao longo destes tempos.

À FCT-UNL, pelo acolhimento como aluno de mestrado, uma honra em pertencer a tão prestigiada instituição.

A todos os meus amigos e colegas, pela amizade e trabalho conjunto realizado ao longo de todo o curso.

Por último, tendo consciência que sozinho nada disto seria possível, dirijo um agradecimento especial aos meus pais, por serem modelos de coragem, pelo seu apoio incondicional, incentivo e paciência demonstrados e por toda a ajuda na superação dos obstáculos que ao longo desta caminhada foram surgindo.

# Resumo

---

Com este trabalho pretendeu-se estudar a eficácia de dois tipos de fornos solar com lentes de Fresnel e compará-los com os fornos solares parabólicos já existentes. Foi desenvolvido um protótipo para um dos fornos solares estudados.

Ao longo deste trabalho foram feitas simulações computacionais no *software* de simulação ótica ZEMAX® para encontrar o esquema do forno solar ideal, com o objetivo de obter o maior fluxo e potência solar no foco. Os esquemas de forno solar baseiam-se na redirecção e focagem de luz com lentes de Fresnel para uma região focal comum.

A melhor configuração para forno solar foi encontrada para um esquema de 6 lentes de Fresnel e 6 espelhos planos. Este esquema foi também simulado para bombeamento de um disco de Nd:YAG, com um concentrador secundário e respetivo sistema de arrefecimento, para produção de laser. A potência do laser e qualidade de feixe foram analisadas através do *software* LASCAD®.

Com a ajuda do Professor Dawei Liang e Msc. Joana Almeida foi realizada a construção do forno solar com 21 espelhos planos e 21 lentes de Fresnel.

**Palavras-Chave:** Lente Fresnel, Forno solar, Espelho, Laser, Potência.

# Abstract

---

This work aims to study the effectiveness of two types of solar furnace with Fresnel lenses and compares them with the existent parabolic solar furnaces. One of the solar furnaces studied was developed into a prototype.

Throughout this work, optical simulations were done with ZEMAX<sup>®</sup> to find the optimal design of the solar furnace to get the highest concentrated solar flux and power in a focal spot. The solar furnace schemes are based on light focusing Fresnel lens and mirroring light redirection into a common focal region.

The best solar furnace scheme with 6 Fresnel lenses and 6 flat mirrors was numerically studied and found. This scheme was also used to simulate the solar pumping of a Nd:YAG laser disk, with a second concentrator and the respective cooling system, for laser production. LASCAD<sup>®</sup> numerical analysis was used to quantify the laser beam output power and beam quality.

With the help of Professor Dawei Liang and Msc. Joana Almeida, the construction of the solar furnace with 21 plane mirrors and 21 Fresnel lenses was finally carried out.

**Key Word:** Fresnel lens, Solar Furnace, Mirror, Laser, Power.

# Índice

---

Capítulo 1.	Enquadramento.....	1
Capítulo 2.	Introdução.....	3
2.1.	Forno solar .....	3
2.2.	Tipos de concentradores solares.....	5
2.3.	Concentrador Parabólico .....	7
2.4.	Concentrador de lente Fresnel.....	7
2.5.	Radiação solar .....	9
2.6.	Lei de Stefan-Boltzmann.....	11
2.7.	Aplicações .....	12
Capítulo 3.	Cálculo numérico e simulação .....	13
3.1.	Simulação computacional em ZEMAX® .....	13
3.1.1.	Fontes do ZEMAX® .....	14
3.1.2.	Descrição dos elementos geométricos.....	15
3.1.3.	Detetores ZEMAX® .....	17
3.1.4.	Otimização .....	17
3.1.5.	Propriedades do ZEMAX® .....	19
Capítulo 4.	Simulações dos fornos solares em ZEMAX® .....	21
4.1.	Concentrador parabólico da FCT-UNL.....	21
4.1.1.	Cálculos e simulação em ZEMAX® .....	21
4.2.	Concentrador parabólico médio do PROMES-CNRS.....	23
4.2.1.	Cálculo numérico e simulação em ZEMAX® .....	23
4.3.	Forno solar constituído por 6 lentes de Fresnel e 6 espelhos planos (6F6E) .....	24
4.3.1.	Estudo individual do conjunto de 6 lentes Fresnel e 6 espelhos planos (6F6E)..	24
4.3.2.	Estudo completo do sistema de 6 lentes de Fresnel e 6 espelhos planos (6F6E)	26
Capítulo 5.	Concentrador solar constituído por 21 espelhos e 21 lentes de Fresnel (21E21F)	29
5.1.	Estudo do concentrador 21E21F .....	29
5.2.	Fabricação e construção das peças e montagem individual do forno solar 21E21F ...	33
5.2.1.	Unidade ótica.....	33
5.2.2.	Suporte para unidade ótica .....	33
5.2.3.	Unidade suporte base de ferro .....	34
5.2.4.	Suporte de base de torno multi-ângulo.....	35



5.3.	Montagem e experiências preliminares do forno solar 21E21F.....	37
5.3.1.	Montagem experimental.....	37
5.3.2.	Ensaio experimentais .....	37
5.4.	Tabela dos custos .....	39
Capítulo 6.	Aplicações a laser com fornos solar com lentes de Fresnel .....	41
6.1.	Introdução .....	41
6.1.1.	Laser.....	41
6.1.2.	Laser Nd:YAG .....	47
6.2.	Sistema de bombeamento do laser 6F6E6S .....	51
6.2.1.	Simulação do laser de 6F6E6S em ZEMAX®.....	53
6.2.2.	Análise numérica do disco laser de Nd:YAG em ZEMAX® .....	55
Capítulo 7.	Discussão de resultados, conclusão e perspectivas futura.....	59
Capítulo 8.	Referência bibliográfica .....	61
Capítulo 9.	ANEXO.....	63

# Índice de figuras

---

Figura 2.1 – Atuação do forno solar do Lavoisier em Paris.....	3
Figura 2.2 - Forno solar de 1MW no CNRS-PROMMES, emOdeillo, França.....	4
Figura 2.3 – Estágio no CNRS-PROMMES durante o mês de Julho de 2012, vista frontal do forno solar de 1 MW. ....	4
Figura 2.4 - Configuração básica da lente de Fresnel em comparação com uma lente convencional. ....	8
Figura 2.5 - Lente de Fresnel em ZEMAX® .....	8
Figura 2.6 - Aberração cromática de uma lente de Fresnel.....	8
Figura 2.7 - Espectro da radiação solar. ....	9
Figura 2.8 - Incidência radial solar máxima à superfície da Terra. ....	10
Figura 3.1 - Interface do Software: a) Editor de multiconfigurações (multi-configuration editor), b) Editor de componentes não sequencia (non-sequential component editor), c) função de mérito (merit function), d) NSC 3D Layout.....	13
Figura 3.2– Exemplos dos tipos de fontes emissoras de raios, existentes no ZEMAX.....	14
Figura 3.3 – Exemplo da programação dos parâmetros da fonte radiante. ....	14
Figura 3.4 - Parametrização dos objectos utilizados no ZEMAX® .....	15
Figura 3.5 - Catálogo de materiais disponíveis no ZEMAX®.....	16
Figura 3.6– Definição da percentagem de absorção da interface do objecto. 1.02 equivale a 2 % de absorção.....	16
Figura 3.7 – Exemplo de parametrização de uma variável. À esquerda, na linha 16, um dos parâmetros é tomado como variável. À direita encontra-se a janela de escolha do parâmetro do objeto. ....	18
Figura 3.8 – Função pick up.....	19
Figura 4.1 – Concentrador parabólico da FCT-UNL .....	21
Figura 4.2 – Simulação do concentrador parabólico da faculdade no ZEMAX®: a) Programação no Zemax. b) Desenho do modelo não sequencial. c) Distribuição da potência no foco e o seu fluxo. ....	22
Figura 4.3 – Concentrador solar do PROMES-CNRS em Odeillo, França.....	23
Figura 4.4 - Simulação do concentrador parabólico médio em PROMES-CNRS: a) Programação no ZEMAX®. b) Desenho do modelo não sequencial. c) Distribuição da potência no foco e respectivo fluxo.....	23
Figura 4.5 – (a) Unidade ótica do forno solar composto por a lente Fresnel e o espelho. (b) Desenho a 3D no modo não sequencial do ZEMAX®. ....	24
Figura 4.6 – Programação do sistema no ZEMAX®.....	25
Figura 4.7– Região do foco de uma únicaunidade ótica. ....	25
Figura 4.8 – Sistema ótico completo do forno solar 6F6E no ZEMAX®.....	26
Figura 4.9 – Programação completa do sistema 6F6E no ZEMAX®.....	26
Figura 4.10 – Função de mérito do esquema 6F6E.....	27
Figura 4.11- Zona do foco produzido pelo conjunto de 6 lentes de Fresnel e 6 espelhos.....	27
Figura 5.1 – Imagem em Autocad do concentrador solar 21E21F.....	29
Figura 5.2- Descrição caminho ótico da unidade ótica em ZEMAX®.....	29
Figura 5.3 – Programação no Zemax®do concentrador solar 21E21F juntamente com o espelho parabólico da FCT-UNL. ....	31

Figura 5.4- Alinhamento das 21 unidades óticas do forno solar em ZEMAX® .....	32
Figura 5.5- Distribuição do foco ao longo de um detetor quadrado de secção 20mm. ....	32
Figura 5.6 – Montagem de 10 unidades óticas do forno solar 21E21F.....	33
Figura 5.7– Unidade de suporte para o acrílico depois da sua montagem: (a)(b) Fixação do puxador de PVC com varão de inox ao suporte de acrílico (c) Vista ampliada da fixação do varão no cilindro de PVC, encaixados no puxador. ....	34
Figura 5.8 – Fixação da base de ferro ao anel de suporte do concentrador parabólico.....	34
Figura 5.9 - Montagem completa do suporte de base.....	35
Figura 5.10 – Graus de liberdade de rotação do grampo multi-angulos. a) Rotação e b) translação.....	35
Figura 5.11 - Peça de aço de construção cortado para suporte de torno multi-angulo.....	35
Figura 5.12 – Unidade suporte de grampo multi-angulo. a) Unidade de suporte de grampo multi-angulo com peça de aço de construção cortado. b) Montagem completa do suporte de torno multi angulos.....	36
Figura 5.13 – Montagem de 10 unidades óticas com os respectivos suporte.....	37
Figura 5.14- Condição de alinhamento da unidade ótica, o círculo mais brilhante pertence à imagem da unidade ótica e as imagens elípticas são do concentrador parabólico. ....	37
Figura 6.1 - Forno solar 6F6E para bombeamento do disco laser solar. ....	41
Figura 6.2– Processo de transição. (a) Absorção, (b) emissão espontânea e (c) emissão estimulada .....	42
Figura 6.3 - Largura de linha de uma transição atômica centrada em $\nu_0$ e em sinal de banda estreita centrado em $\nu_s$ .....	45
Figura 6.4 - População relativa em dois níveis energéticos para (a) equilíbrio térmico e (b) inversão de população. ....	46
Figura 6.5 – Cavidade de ressonância.....	47
Figura 6.6 – Diagrama detalhado dos níveis de energia para o ião neodímio no YAG indicando a principal transição de laser.....	49
Figura 6.7 – Espectro de emissão solar e espectro de absorção do Nd:YAG .....	50
Figura 6.8 – Vista lateral do percurso ótico do sistema de bombeamento de laser.....	51
Figura 6.9 – (a) Vista frontal do concentrador secundário. (b) Vista superior do concentrador secundário de seis faces esféricas de sílica.....	52
Figura 6.10– Cavidade para o disco de laser solar de estado solido e os respectivos suportes mecânicos e sistema de arrefecimento. ....	52
Figura 6.11 – (a) Vista lateral do compósito de Nd:YAG/YAG disco laser com o arrefecimento por água, e o percurso ótico de bombeamento. (b) Vista superior do compósito de Nd:YAG/YAG e respetivo direção de bombeamento. ....	53
Figura 6.12 – Programação em ZEMAX® de laser com forno solar 6F6E. ....	54
Figura 6.13 – Otimização em ZEMAX® da simulação do laser. ....	55
Figura 6.14 - Perfil absorção de bombeamento do disco fina laser de Nd:YAG .....	55
Figura 6.15 – Potência de laser solar para diferentes diâmetros do disco fino e ângulo de inclinação da face lateral do disco compósito. ....	56
Figura 6.16– (a) Potência do laser em função da refletibilidade dos outputs coupler. (b) Potência de laser em função da potência absorvida. ....	56
Figura 6.17– (a) Carga de calor no ganho meio activo do disco de laser dopado de $\text{Nd}^{3+}$ . (b) Distribuição de temperatura do ganho medio do cristal do disco. ....	57

# Índice das tabelas

---

Tabela 1 – Tipos de concentradores solares.....	5
Tabela 2 – Resumo das vantagens e desvantagens dos concentradores solares da atualidade.....	5
Tabela 3 – Fluxo e potência no foco dos fornos solares existentes [6-7].....	6
Tabela 4 – Temperatura a diferentes níveis de fluxos.....	11
Tabela 5 – Temperatura mínima para haver uma reação no material. ....	12
Tabela 6 – Parâmetros da lente de Fresnel no ZEMAX®.....	24
Tabela 7 – Especificações da lente de Fresnel fornecida pelo fornecedor. ....	30
Tabela 8 – Custo do protótipo. ....	39
Tabela 9 - Parâmetros espectroscópicos do Nd:YAG a 300 K [10].....	48
Tabela 10 – Resultado das simulações dos fornos solares no ZEMAX® com irradiância solar de 950 W/m <sup>2</sup> . ....	59

# Símbolos e notações

---

$a$	Abertura da parábola
$f$	Distância focal
$\Phi_{Máx}$	Ângulo de aceitação máxima
$\lambda$	Comprimento de onda
$R_{Sol}$	Raio do sol
$L_{TS}$	Distância do sol à Terra
$\theta_s$	Ângulo de incidência
$E$	Emissividade
$\sigma$	Constante de StefanBoltzmann
$\rho, F$	Fluxo de energia
$\Delta H$	Diferença de entalpia
$I_0$	Potência solar inicial
$C_n$	Constante de difusão do cosseno do emissor.
$\eta_{espelho}$	Refletibilidade do espelho
6F6E	Forno solar com 6 lentes de Fresnel - 6 espelhos planos
$D_l$	Distância entre a lente Fresnel e espelho
$H_l$	Altura da lente de Fresnel em relação ao detetor no foco do forno solar 6E6F
21E21F	Forno solar com 21 espelhos - 21 lentes de Fresnel
Nd:YAG	Neodymium-doped yttrium aluminum garnet
$h$	Constante de Planck
$\nu$	Frequência (Hz)
$N, n$	Densidade de população
$\rho(\nu)$	Densidade de radiação
$g$	Degenerescência
$\alpha(\nu_s)$	Coeficiente de absorção em função da frequência
$c$	Constante da velocidade da luz no vácuo
$M^2$	Fator de qualidade do feixe
$B$	Brilho
6F6E6S	Sistema de bombeamento de laser com 6 lentes de Fresnel, 6 espelhos planos, e concentrador secundário constituído por 6 faces esféricas de sílica fundida

HR	Espelho de alta reflexão
PR	Espelho de reflexão parcial

# Capítulo 1. Enquadramento

Esta dissertação enquadra-se no estudo de forno solar composto por lentes de Fresnel, com utilização do programa de simulação ótica ZEMAX<sup>®</sup> para obtenção da maior potência possível a partir destes sistemas óticos.

Foram simulados 2 fornos solares com lentes de Fresnel, um dos quais é composto por 6 lentes de Fresnel e 6 espelhos, sendo posteriormente utilizado para simulação de disco laser solar. O estudo do respetivo sistema ótico resultou numa publicação em RIAO/OPTILAS. Foi ainda possível o desenvolvimento de um protótipo de outro forno solar, composto por 21 lentes de Fresnel e 21 espelhos, e o qual foi adaptado para o espelho parabólico da FCT-UNL, para fins de investigações futuras em bombeamento de laser de estado sólido, processamento de materiais, etc.





## Capítulo 2. Introdução

### 2.1. Forno solar

Um forno solar, também conhecido por concentrador de energia solar, é um sistema ótico através do qual a radiação solar é concentrada numa pequena área (geralmente numa cavidade), onde são obtidas altas temperaturas. Os fornos solares podem apresentar diversos tamanhos, desde paraboloides de 1 m<sup>2</sup> até sistemas óticos de milhares de m<sup>2</sup> com refletores conhecidos por heliostatos. Os fornos solares são ferramentas ideais para o estudo de propriedades químicas, óticas, elétricas e termodinâmicas dos materiais no âmbito de altas temperaturas, como o estudo das fases, vaporização, fusão, purificação e estabilização de material cerâmico, crescimento de cristais, calor específico, condutância térmica, etc. Recentemente, muitos dispositivos de altas temperaturas (para além dos 2000 K) como o forno de indução, forno a arco, aparelhos de bombardeamento de eletrões, plasmas, etc., são usados (com ou sem campos eletromagnéticos variados na atmosfera) para o tratamento e estudo de materiais. Contudo, na prática todos estes aparelhos e dispositivos não conseguem evitar contaminações. Os fornos solares apresentam vantagens: dispositivo simples, geração de alto fluxo de calor (4000 K para o corpo negro) sem contaminação, encontram-se num ambiente controlado (sem campos externos fortes tais como os eletromagnéticos), e de observação contínua. Os maiores fornos solares encontram-se instalados em França e Uzbequistão[1]

Apesar de o forno solar apresentar tantas vantagens, estas são pouco reconhecidas na indústria devido às seguintes razões:

- Custo de construção elevado.
- O forno solar só é adequado para operações que permitam interrupções, devido à mudança das condições atmosféricas.
- No forno solar, só é possível obter grandes temperaturas numa área muito pequena (de alguns milímetros).

O uso de forno solar poderá vir a ser lucrativo, no futuro, em materiais de indústria, devido à subida do custo dos combustíveis convencionais e ao avanço da investigação no *design* do forno solar.[1]

Nos finais do século XVIII, Lavoisier construiu o primeiro concentrador solar, constituído por um sistema de lentes (Figura 2.1), conseguindo atingir temperaturas de fundição da platina (1773 °C). Em 1904, Manuel António Gomes, conhecido por Padre Himalaias, o pai das energias renováveis, foi o primeiro português a construir um forno solar, o Pirelióforo. [2]

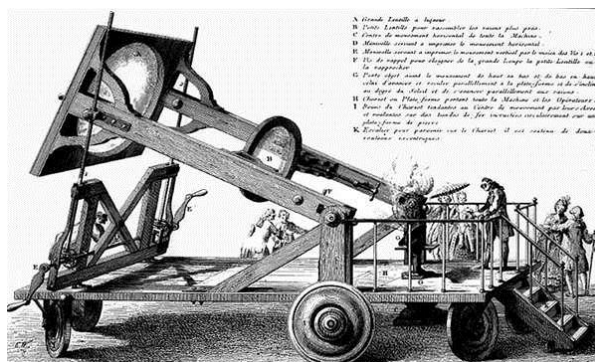


Figura 2.1 – Atuação do forno solar do Lavoisier em Paris.

Só recentemente, na segunda metade do século XX, começaram a efetuar-se estudos aprofundados destes sistemas ópticos para aplicação em processamento e modificação de materiais. Durante a segunda guerra mundial, Felix Trombe<sup>1</sup> transformou os holofotes parabólicos de defesa das forças militares alemãs, em concentradores solares. A partir deste advento foi possível efetuar várias experiências nas áreas de química e metalurgia que envolviam fusão e purificação de materiais cerâmicos. Em 1949, foi possível pela primeira vez derreter bronze no foco de um forno solar, constituído por um heliostato e um concentrador parabólico. [3]

O forno solar mais conhecido atualmente encontra-se situado em Odeillo, França (Figura 2.2) a 1800 m de altura em relação ao nível do mar. Este forno solar é composto por um refletor parabólico de 53.5 m de altura e 40 m de largura, com distância focal de 18 m. Este é constituído por 9500 espelhos de 0.45 m  $\times$  0.45 m. O refletor parabólico é iluminado por 63 heliostatos posicionados em escada, perfazendo uma área total de 2835 m<sup>2</sup>. Cada heliostato apresenta 180 espelhos de 0.5 m  $\times$  0.5 m. [4]



**Figura 2.2 - Forno solar de 1MW no CNRS-PROMMES, em Odeillo, França.**



**Figura 2.3 – Estágio no CNRS-PROMMES durante o mês de Julho de 2012, vista frontal do forno solar de 1 MW.**

---

<sup>1</sup>Felix Trombe foi um engenheiro francês, pioneiro na área de construções fornos solares, tais como a parede de Trombe e a construção experimental de forno solar de 50kW em Mount-Louis, em 1949.

## 2.2. Tipos de concentradores solares

Vários modelos de concentradores solares foram estudados para otimizar a sua execução. Os vários tipos de fornos solares, encontram-se categorizados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Tipos de concentradores solares.**

	Descrição
<b>Refletor</b>	<p>Ao colidir no concentrador, a radiação é refletida para o foco.</p> <p>Exemplo: disco parabólico, CPC, concentrador hiperboloide.</p>
<b>Refrator</b>	<p>Ao colidir no concentrador, os raios solares são refratados para o foco.</p> <p>Exemplo: Concentradores de lentes de <i>Fresnel</i>.</p>

Tabela 2 apresenta as vantagens e desvantagens de cada tipo de concentrador solar.

**Tabela 2 – Resumo das vantagens e desvantagens dos concentradores solares da atualidade.**

Tipo de concentrador	Vantagens	Desvantagens
Concentrador parabólico	Alta concentração	Precisa de seguidores de grande área
Concentrador Hiperbólico	Compacto	Precisa de lentes na entrada para ter uma eficiência aceitável
Concentrador de Lentes de Fresnel	<p>Espessura mais fina em relação às lentes convencionais.</p> <p>Precisa de menos material em comparação com outros concentradores.</p> <p>Consegue separar a luz direta da difusa para controlo de iluminação e temperatura dos interiores dos edifícios.</p>	Imperfeição das lentes causa aberração cromática.

Na Tabela 3 são comparados os diversos fornos solares atualmente existentes.

**Tabela 3 – Fluxo e potência no foco dos fornos solares existentes [6-7].**

<b>País</b>	<b>Localização</b>	<b>Tecnologia</b>	<b>Densidade de potência máxima (W/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Potência (kW)</b>
França	Odeillo, CNRS	Forno solar médio	16	1.5
		Forno solar	10	1000
		Forno solar	4.7	1000
	Odeillo, DGA	Forno solar médio	6	45
Uzbequistão	Tashkent	Forno solar	10	1000
Alemanha	Cologne, DLR	Forno solar	5.2	22
Espanha	Almeria, PSA- CIEMAT	Torre solar	1-2	3360-7000
		Forno solar	2.5	60
	Madrid, CENIM, CSIC	Lentes Fresnel	2.64	0.6
Suíça	Villigen, PSI	Forno solar	5	45
		Forno solar	4	15
		Lentes Fresnel	4	70
USA	Albuquerque, Sandia	Forno solar	3	25
	Denver, NREL	Forno solar	2.5-20	6
	Minneapolis	Forno solar	7	1000

### 2.3. Concentrador Parabólico

Os espelhos parabólicos são instrumentos particularmente úteis em aplicações onde o objetivo é concentrar um elevado fluxo de energia numa pequena área.

O concentrador parabólico é um espelho que respeita as equações de uma parábola cuja função principal é a reflexão de raios paralelos ao seu eixo, provenientes da fonte de energia luminosa, direcionando-os para o foco, aumentando assim o fluxo energético.

O concentrador tem uma forma que obedece à uma equação de uma parábola, dada pela ((1)).

$$y = a \cdot x^2 \quad (1)$$

A constante “a” define a abertura da parábola.

$a < 1$ , a função de uma parabólica de abertura larga.

$a = 1$ , a função de uma parabólica normal.

$a > 1$ , a função de uma parábola de pequena abertura.

A distância focal ( $f$ ) do espelho parabólico é a distância a que o espelho forma o ponto de concentração da radiação:

$$x^2 = 4 \cdot f \cdot y \quad (2)$$

Com a (1) e (2), a distância focal pode ser determinada apenas em função da constante “a”, ou seja:

$$f = \frac{1}{4 \cdot a} \quad (3)$$

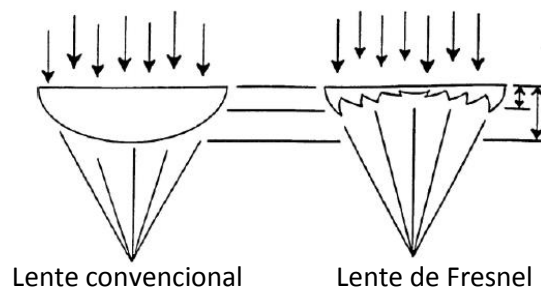
O ângulo de aceitação é o ângulo dado pela inclinação máxima com que um raio de luz, depois de atingir a superfície do espelho parabólico, chega ao foco. Geometricamente, o ângulo de aceitação  $\phi_{Máx}$  é dado por:

$$\phi_{Máx} = \arctan\left(\frac{x_{Máx}}{f - y_{Máx}}\right) \quad (4)$$

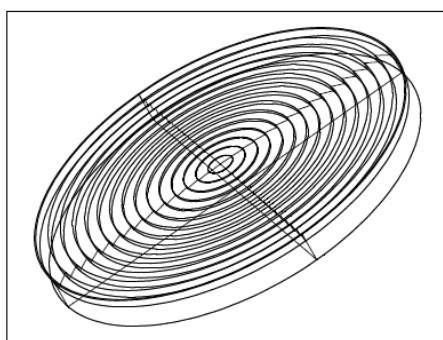
### 2.4. Concentrador de lente Fresnel

Este tipo de lente foi inventada pelo físico francês Augustin-Jean Fresnel, para o uso de faróis. Comparativamente às lentes convencionais, a lente de Fresnel é mais fina, o seu peso e volume são mais reduzidos, pelo que a luz incidente sofre menos atenuação. Deste modo a luz emitida pelos faróis equipados com este tipo de lentes consegue ser visível a distâncias maiores.

As lentes de Fresnel são lentes planas de anéis circulares concêntricos sucessivos na sua superfície.



**Figura 2.4 - Configuração básica da lente de Fresnel em comparação com uma lente convencional.**



**Figura 2.5 - Lente de Fresnel em ZEMAX®**

Os parâmetros gerais de uma lente de Fresnel comercial são:

**Profundidade**, este parâmetro corresponde à profundidade de cada ranhura da lente.

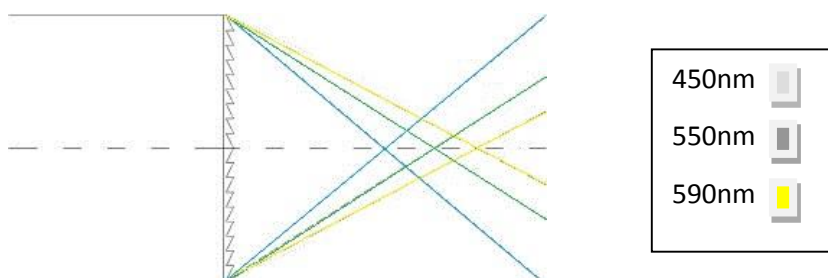
**Frequência** corresponde à frequência dos sulcos.

**Pitch** (graus) é a inclinação das faces da superfície em relação à base da lente de Fresnel.

**Espessura** da lente de Fresnel.

Estes parâmetros determinam a distância focal da lente de Fresnel

A desvantagem principal destas lentes é o facto de possuírem aberração cromática, que leva a um decréscimo da eficiência de concentração da energia solar. A aberração cromática é caracterizada por raios de luz de diferentes comprimentos de onda alcançando o foco a diferentes distâncias da lente. Pode ser definida como a incapacidade da focar todas as cores num mesmo plano focal, pois a lente possui um índice de refração diferente para diferentes comprimentos de onda. Dado que a distância focal  $f$  de uma lente depende do índice de refração  $n$ , diferentes comprimentos de onda de luz são focados em diferentes posições. Figura 2.6.



**Figura 2.6 - Aberração cromática de uma lente de Fresnel.**

A qualidade da imagem produzida pela lente de Fresnel pode ser pior em comparação com uma lente convencional. No entanto, as lentes de Fresnel são bastante úteis devido ao seu reduzido peso e espessura, tornando a luz transmitida menos atenuada.

## 2.5. Radiação solar

O sol é uma esfera gasosa extremamente quente, cujo diâmetro é de  $1.39 \times 10^9$  m. A energia solar percorre uma distância de  $1.5 \times 10^{11}$  m entre a superfície do Sol e a superfície da Terra. A temperatura efetiva do corpo negro é de 5762 K [8-9], enquanto a temperatura estimada no centro do Sol é de  $24 (\pm 16) \times 10^6$  K. O Sol é portanto considerado um reator de fusão, convertendo hidrogénio em hélio. A potência total emitida pelo sol é de  $3.8 \times 10^{20}$  MW, equivalente a  $63 \text{ MW/m}^2$  de densidade de potência. Esta energia de radiação é propagada em todas as direções, sendo apenas a potência de  $1.7 \times 10^{14}$  kW aproveitada pela Terra [5].

No estudo do corpo negro, o espectro solar é equivalente à temperatura de 5800 K. Após a combinação do efeito do vapor de água, poeira e adsorção de varias moléculas do ar, certas bandas de frequências são absorvidas, resultando numa diminuição da porção do espectro solar recebido na superfície da Terra (ver Figura 2.7). A área debaixo da curva é a potência total radiada por metro quadrado na superfície terrestre, a uma temperatura específica.

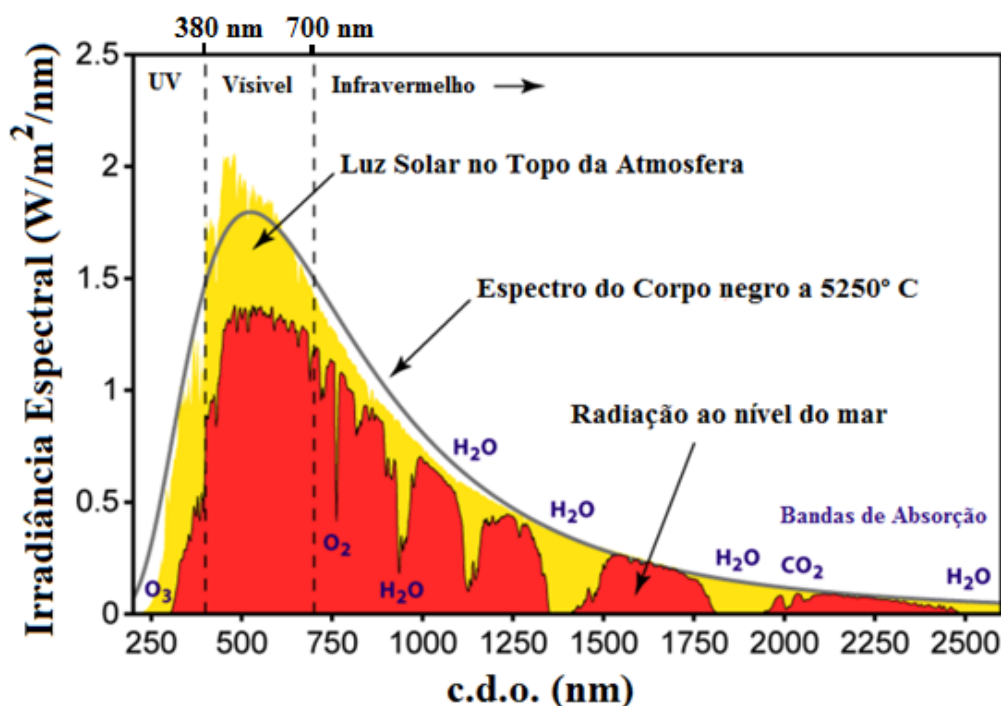
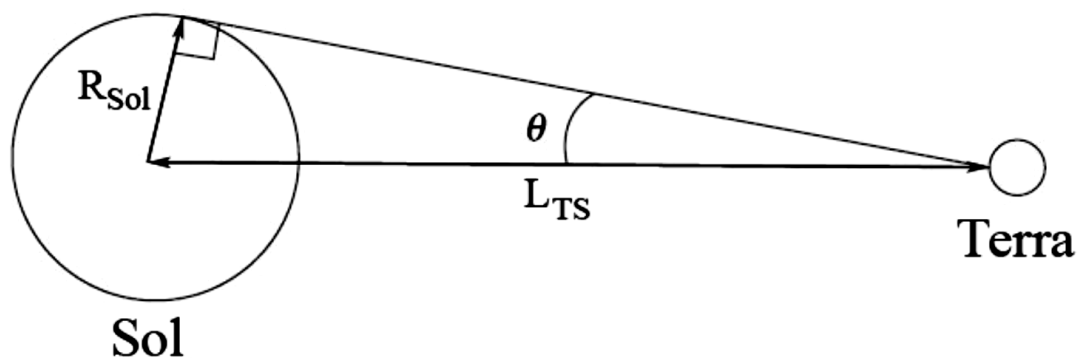


Figura 2.7 - Espectro da radiação solar.

Uma das desvantagens da luz solar é o facto de não ser considerada como uma fonte radial pontual na superfície da terra (Figura 2.8) [6].



**Figura 2.8 - Incidência radial solar máxima à superfície da Terra.**

Com estes valores é possível calcular o ângulo máximo de incidência dos raios solares à superfície terrestre, seguindo a (5).

$$\left(\frac{R_{Sol}}{L_{TS}}\right)^2 = \left(\frac{1}{\sin \theta}\right)^2 \quad (5)$$

Obtendo assim o valor do ângulo de incidência máxima  $|\theta_s| \approx 0.27^\circ$ .

O fluxo de energia irradiado pelo Sol é definido pela potência solar total por unidade de área à distância de uma unidade astronômica (1 u.a., distância do centro do Sol ao centro da Terra), sendo a área normal aos raios solares.



## 2.6. Lei de Stefan-Boltzmann

A Lei de Stefan-Boltzmann (também conhecida por Lei de Stefan) estabelece que a potência total radiada por unidade de área superficial do corpo negro por unidade de tempo  $\rho$ , é diretamente proporcional à quarta potência da sua temperatura  $T$ .

$$\rho = \varepsilon \sigma T^4 \quad (6)$$

Onde  $\sigma$  é a constante de Stefan Boltzmann,  $\sigma = 5,6697 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  e  $\varepsilon$  a emissividade do material. No caso do corpo negro,  $\varepsilon = 1$ .

Caso se pretenda usar a densidade de potência ( $\text{kW/cm}^2$  ou  $\text{W/mm}^2$ ) é utilizada a seguinte equação:

$$F = AT^4 \quad (7)$$

Onde  $A = 5.666 \times 10^{-14} (\text{kW/cm}^2)/(\text{K}^4)$ .

A relação do fluxo com a temperatura é representada na Tabela 4. A temperatura atingível depende do fluxo presente no alvo e da sua emissividade.

**Tabela 4 – Temperatura a diferentes níveis de fluxos.**

Fluxo, $\text{W/mm}^2$	Corpo negro $T$ , K
0.1	1153
0.5	1724
1	2050
2	2440
5	3065
10	3645
15	4034
20	4334

## 2.7. Aplicações

Uma forma de transmissão do calor é por radiação. Quando o material recebe energia superior à energia livre de Gibbs o material pode sofrer vários tipos processos, tais como mudança de estado, quebra de ligação intramoleculares, etc.

- Nos 1400 °C pode processar hidrogénio com quebras de ligações intramoleculares do metano.
- Nos 2500 °C é possível elaborar testes de materiais em ambientes extremos tais como os reatores nucleares ou reentrada de veículos espaciais na atmosfera.
- Nos 3500 °C é possível produzir nano materiais por sublimação com indução solar, tais como nanotubos de carbono e nanopartículas de zinco.
- Com temperaturas ainda mais elevadas, é possível quebrar as ligações intramoleculares de metais comuns:

**Tabela 5** – Temperatura mínima para haver uma reação no material.

<b>Metal</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MgO</b>	<b>ZnO</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>CaO</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	3700	>4000	3700	>2355	>4000	4500	4400

O primeiro laser de estado sólido bombeado por radiação solar foi relatado por Young em 1966 [7]. Desde então, muitos investigadores têm vindo a explorar o uso destes fornos solares, aproveitando o foco para bombeamento de cristais de laser de estado sólido e vários esquemas foram propostos para aumentar o desempenho deste tipo de lasers.

## Capítulo 3. Cálculo numérico e simulação

### 3.1. Simulação computacional em ZEMAX®

Este *software* permite desenhar, analisar e otimizar sistema óticos onde um dado raio de luz parte da fonte para uma primeira superfície do sistema, depois para uma segunda superfície e assim sucessivamente, numa sequência predefinida. Contudo, sistemas mais complexos, como os esquemas estudados neste projeto, requerem um traçado de raios não sequencial, ou seja, qualquer raio pode incidir num objeto sem uma ordem predefinida e pode até incidir múltiplas vezes no mesmo objeto.

Através do ZEMAX®, é possível simular um sistema ótico e saber a quantidade de energia transmitida e a sua distribuição no alvo, podendo-se sempre fazer alterações do sistema ótico de modo a otimizar a energia transmitida, sem ter de passar por uma parte prática.

O ZEMAX® tem quatro janelas essenciais:

- **“Lens data editor”**: de uma forma geral, é onde se definem os componentes da configuração a serem simulados;
- **“Non-Sequential Component Editor”**: é aqui que se definem os diversos tipos de objetos (fontes de energia, concentradores, guias de onda, dispositivos, sólidos, detetores, etc.) para uma simulação não-sequencial a estudar, bem como os seus posicionamentos espaciais (tendo em conta as componentes x, y e z), o tipo de material dos objetos, entre outros parâmetros;
- **“NSC 3D Layout”**: onde é possível visualizar os objetos definidos na janela “Non-Sequential Component Editor”;
- **“Merit Function Editor”**: onde é possível definir as condições de restrição para uma otimização automática.

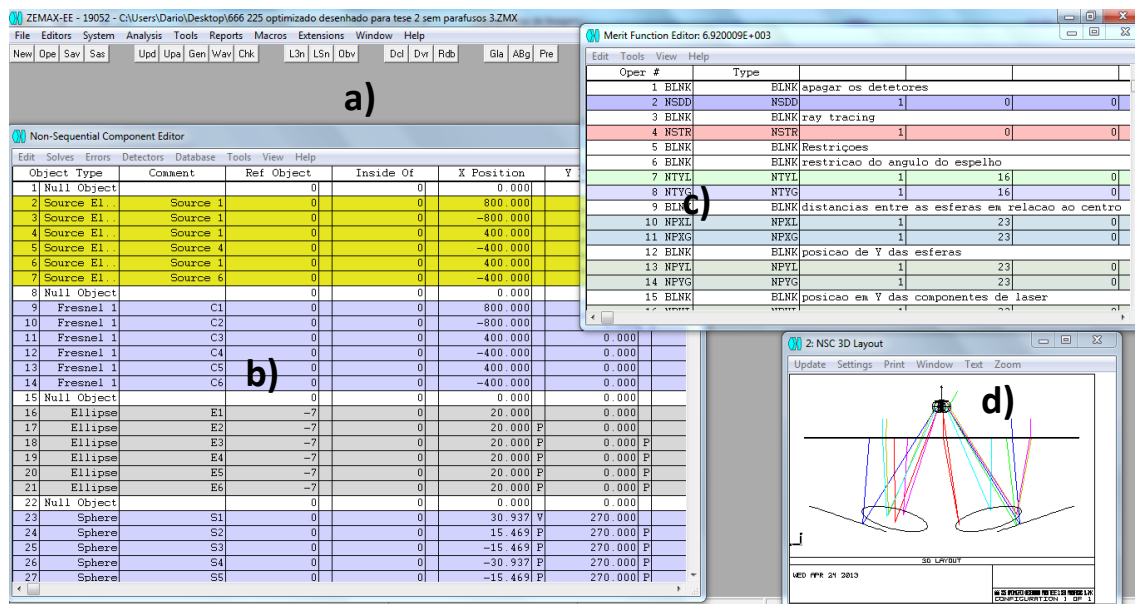


Figura 3.1 - Interface do Software: a) Editor de multiconfigurações (multi-configuration editor), b) Editor de componentes não sequencia (non-sequential component editor), c) função de mérito (merit function), d) NSC 3D Layout

Os componentes não sequenciais existentes no ZEMAX® são geralmente objetos tridimensionais e encontram-se subdivididos em três categorias:

- Fontes emissoras – é o objeto emissor de raios utilizados na simulação
- Elementos óticos geométricos – definem os componentes óticos com as respectivas geometrias e tipo de material utilizado
- Detetores – adquirem a informação qualitativa/quantitativa relativa aos raios que com este colidem.

Com os três tipos de objetos referidos, é possível desenhar e parametrizar todo o sistema ótico que transfere a radiação de bombeamento até ao ponto focal do forno solar e/ou ao meio ativo do sistema de laser de disco.

### 3.1.1. Fontes do ZEMAX®

Na simulação das fontes de luz foram utilizados os diferentes comprimentos de onda da radiação solar, os quais são definidos na janela “wavelength” (ver Anexo 1).

Existem vários tipos de fontes de luz (Figura 3.2). Dependente da simulação em estudo, a fonte escolhida para análise pode apresentar diferentes tamanhos e geometrias, como por exemplo a “Source Ellipse” (fonte de forma elíptica) ou a “Source Rectangle” (fonte de forma retangular).

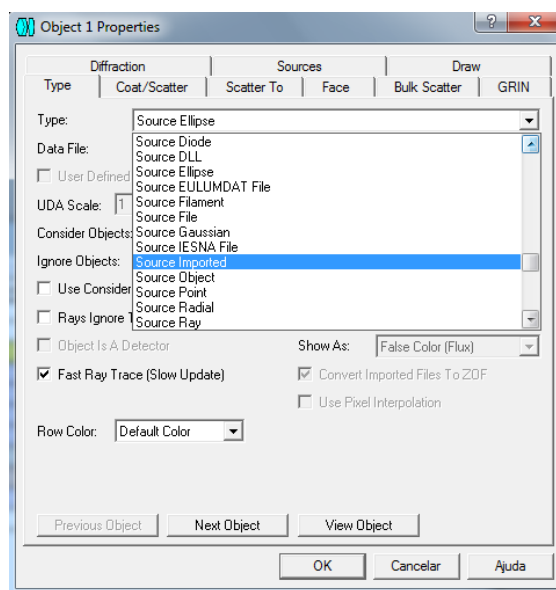


Figura 3.2– Exemplos dos tipos de fontes emissoras de raios, existentes no ZEMAX

O dimensionamento da fonte radiante é definido na janela “Non-Sequential Component Editor” como mostrado na Figura 3.3.

Object Type	# Layout Rays	# Analysis Rays	Power(Watts)	Wavenumber	Color #	X Half Width	Y Half Width	Source Distance	Cosine Exponent
1 Source El...	10	1000000	88.000	0	0	400.000	400.000	0.000	8.000E+004

Figura 3.3 – Exemplo da programação dos parâmetros da fonte radiante.

Existem vários parâmetros comuns em todos os tipos de fontes, como o posicionamento da fonte no sistema tridimensional, a direção dos raios traçados, o número de raios visualizados (“# Layout Rays”), número de raios utilizados na simulação (“# Analysis Rays”), a potência total emitida pela fonte (“Power”), e o espectro de emissão (“Wavenumber”).

No caso das fontes utilizadas para simulação dos fornos solares, “Source Ellipse” e/ou “Source Rectangle”, cada emissor apresenta uma distribuição de intensidade dada por:

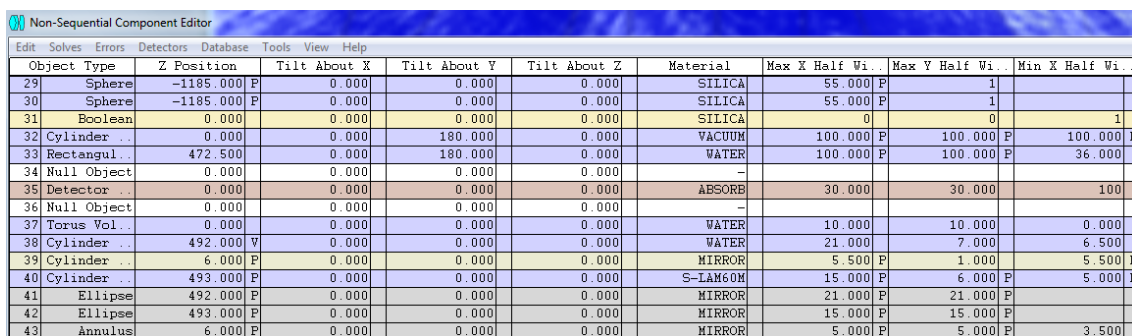
$$I(\theta) \approx I_0(\cos \theta)^{C_n} \quad (8)$$

A (8) é a equação da distribuição de cosseno de raios emitidos, onde o expoente  $C_n$  é a constante de difusão do cosseno do emissor. De acordo com a curvatura e a distância do sol, o valor do  $C_n$  é 80000 no ZEMAX®. Com este valor inserido a fonte solar torna-se difusiva. [8]

O número de raios utilizados no processo de simulação (“# Analysis Rays”) é um parâmetro crítico em todo o processo de modelação do sistema. Um número reduzido de raios nas simulações resulta na redução do tempo despendido, mas a precisão dos resultados é baixa. Por outro lado, um número demasiado elevado de raios considerados resulta numa elevada precisão dos resultados, mas o tempo despendido em cada simulação é também aumentado. Conclui-se portanto que existe um número de raios ótimo para cada simulação, que pode variar desde os centenas de milhares para sistemas óticos de baixa complexidade até vários milhões para sistemas mais complexos. O procedimento para obtenção do número ótimo de raios consiste no seu aumento progressivo até que a potência incidente/absorvida pelos detetores, bem como a distribuição de potência converjam. Devido à complexidade do sistema em análise, foram utilizados cerca de 100 mil raios por fonte para obter resultados com precisão. Nas definições da simulação não sequencial, pode parametrizar-se o número máximo de segmentos por raio, o número de intersecções por cada raio, a intensidade relativa mínima de cada raio, etc.

### 3.1.2. Descrição dos elementos geométricos

A ferramenta ZEMAX® possui uma vasta lista de objetos com formas geométricas predefinidas e programáveis que podem ser utilizados para absorver, refratar, refletir, etc., os raios emitidos pela fonte radiante de acordo com o material escolhido. As propriedades dos objetos são parametrizadas de acordo com o material selecionado no menu editor de componentes não sequenciais na coluna “Material” (Figura 3.4). As colunas à sua esquerda são respeitantes ao posicionamento do objeto no espaço tridimensional, enquanto as colunas à direita dizem respeito às dimensões e propriedades físicas do objeto, tais como o raio de curvatura de uma lente ou a distância focal.



Object Type	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	Max X Half Wi	Max Y Half Wi	Min X Half Wi
29 Sphere	-1185.000 F	0.000	0.000	0.000	SILICA	55.000 P	1	
30 Sphere	-1185.000 F	0.000	0.000	0.000	SILICA	55.000 P	1	
31 Boolean	0.000	0.000	0.000	0.000	SILICA	0	0	1
32 Cylinder	0.000	0.000	180.000	0.000	VACUUM	100.000 P	100.000 P	100.000 P
33 Rectangul	472.500	0.000	180.000	0.000	WATER	100.000 P	100.000 P	36.000
34 Null Object	0.000	0.000	0.000	0.000	-			
35 Detector	0.000	0.000	0.000	0.000	ABSORB	30.000	30.000	100
36 Null Object	0.000	0.000	0.000	0.000	-			
37 Torus Vol	0.000	0.000	0.000	0.000	WATER	10.000	10.000	0.000
38 Cylinder	492.000 V	0.000	0.000	0.000	WATER	21.000	7.000	6.500
39 Cylinder	6.000 F	0.000	0.000	0.000	MIRROR	5.500 P	1.000	5.500 P
40 Cylinder	493.000 F	0.000	0.000	0.000	S-LAM60M	15.000 P	6.000 P	5.000 P
41 Ellipse	492.000 F	0.000	0.000	0.000	MIRROR	21.000 P	21.000 P	
42 Ellipse	493.000 F	0.000	0.000	0.000	MIRROR	15.000 P	15.000 P	
43 Annulus	6.000 F	0.000	0.000	0.000	MIRROR	5.000 P	5.000 P	3.500

Figura 3.4 - Parametrização dos objectos utilizados no ZEMAX®

Caso se pretenda que um objeto tenha a função de absorver e/ou reflectir qualquer raio que nele incida, deverá seleccionar-se a função “absorb” e/ou “mirror”, respectivamente, na célula “Material” desse objeto. Para que o objeto se comporte como um material refrator, a característica do material deverá ser definida através no menu “Glass Catalog”.

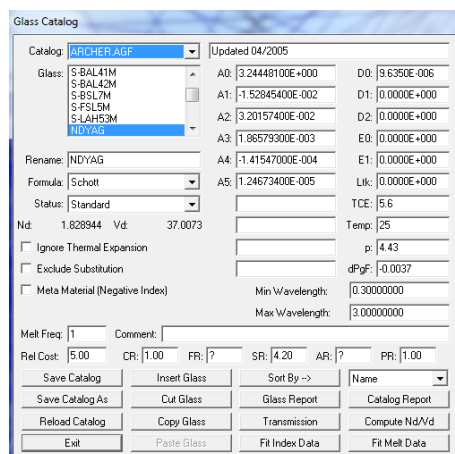


Figura 3.5 - Catálogo de materiais disponíveis no ZEMAX®.

A Figura 3.5 mostra materiais óticos de padrão das várias empresas, mostra também a temperatura crítica, pressão crítica, etc. No entanto, dependendo da necessidade, é possível atualizar o catálogo, adicionando novos materiais e/ou modificando as características dos objetos existentes. Um dos parâmetros que poderá ser alterado é o espectro de absorção/transmissão do material, o qual depende do comprimento de onda da radiação que o atravessa, da dopagem do material, da temperatura, da distância percorrida pela radiação no interior do material. Os valores de transmissão de cada material podem ser definidos tendo em conta o comprimento de onda da radiação e a distância percorrida pela mesma enquanto é absorvida.

Outro parâmetro que pode ser definido é o revestimento da superfície de interface de cada objeto. Aspectos como o revestimento anti reflexão ou alta reflexão podem ser definidos individualmente na janela “coating.” Esta função aplica-se também no caso dos refletores. A Figura 3.6 indica a escolha de várias percentagens de absorção para cada revestimento.

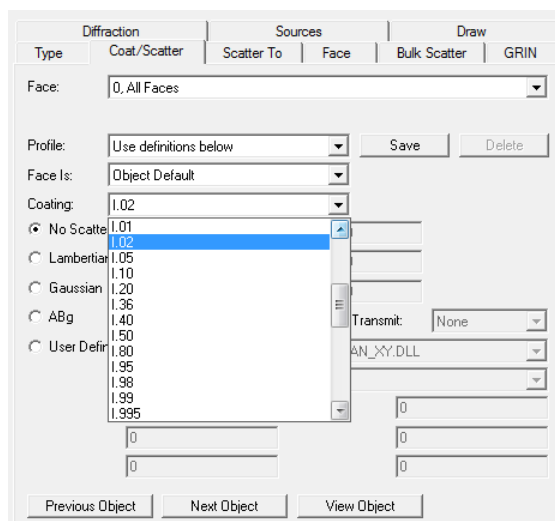


Figura 3.6– Definição da percentagem de absorção da interface do objecto. 1.02 equivale a 2 % de absorção

Qualquer objeto pode ser definido como detetor. No entanto, a informação obtida é apenas do valor total da potência detetada, impossibilitando a obtenção de imagens ou as distribuições bidimensionais e/ou tridimensionais da potência absorvida pelos materiais. Para essa função é necessário unicamente utilizar um detetor, bidimensional ou tridimensional, descrito em seguida.

### 3.1.3. Detetores ZEMAX®

A função dos detetores no ZEMAX® é fornecer informação sobre a potência incidente e/ou absorvida num determinado ponto ou área. Existem vários tipos de detetores no ZEMAX®, o detetor retangular e o detetor volúmico são os mais utilizados neste trabalho.

O **detetor retangular** permite registar dados, entre os quais, a potência incidente, o ângulo de incidência, a distribuição bidimensional de potência e o perfil lateral de potência incidente/absorvida na área definida pelo detetor. Este tipo de detetor pode ser posicionado no interior e/ou exterior de um objeto e pode ter a função de absorver, refletir ou de ser transparente. A forma do detetor está, no entanto, limitada a uma superfície retangular definida pelo utilizador. A resolução da imagem obtida pode ser ajustada pela parametrização do número de pixéis do detetor, tendo consequentemente influência no tempo total necessário para cada simulação. É possível utilizar este tipo de detetor para detetar radiação proveniente apenas de uma direção, com ângulos limitados ou com determinada polarização.

O **detetor volúmico**, é um detetor paralelepípedo cujas dimensões são definidas pelo utilizador, bem como o número de *vóxeis* (*pixéis* em 3 dimensões). Este detetor pode ser colocado no interior, no exterior ou intersectado com um objeto tridimensional. Neste último caso, pode-se parametrizar o detetor de forma a realizar as suas funções no volume de intersecção, assumindo assim a forma tridimensional pretendida pelo utilizador. Com o detetor volúmico pode-se obter informação sobre a potência incidente, potência absorvida e perfil lateral de potência em cada plano do volume, potência absorvida por unidade de volume ou até por cada *vóxel* e a distribuição bidimensional e/ou tridimensional de potência absorvida. A resolução do detetor volúmico influencia o tempo de cálculo de cada simulação, devendo ser ajustada juntamente com o número de raios utilizados na simulação.

### 3.1.4. Otimização

A função de otimização fornecida pelo ZEMAX® é bastante poderosa. É capaz de melhorar o dimensionamento das lentes a partir de um ponto de partida razoável com um conjunto de parâmetros variáveis. As variáveis podem ser quaisquer uns dos parâmetros numéricos do objeto, sendo a posição, dimensão, tipo de material e outros parâmetros específicos de cada objeto. O ZEMAX® utiliza o algoritmo de *damped least square* e/ou algoritmo de *orthogonal descent* para otimização. Estes algoritmos são utilizados para otimizar a função de mérito composta por valores alvo ponderados, estes valores alvo são chamados de "operandos". Estas funções de mérito podem ser alteradas usando o editor de função Mérito (Figura 3.1 d).

A otimização requer três etapas: 1) um sistema razoável, que pode ser simulado adequadamente; 2) a especificação das variáveis; 3) a definição de uma função mérito. Um sistema razoável é um conceito bastante abrangente, que significa que o algoritmo de otimização de projetos mal concebidos não são suscetíveis de se transformar em projetos excecionais (embora existam algumas exceções). Deve haver pelo menos uma variável definida no sistema para o algoritmo de otimização ser capaz de fazer qualquer progresso.

O algoritmo usado pelo recurso de otimização descrito neste capítulo é projetado de algumas formas para encontrar o mínimo "local", com a função de mérito especificada. No entanto, o programa ZEMAX® também tem a capacidade para procurar o mínimo "global" com a mesma função. O mínimo global/local toma o valor mais pequeno possível da função de mérito. Ao atingir este valor, significa que a melhor solução para o sistema em estudo foi alcançada.

Para selecionar uma variável para otimização é preciso modificar o tipo de parâmetro do objeto. Uma vez selecionado, a célula apresenta a letra "V". No exemplo dado na Figura 3.7, a posição no eixo Z do objeto 16 foi selecionada como uma variável para otimização.

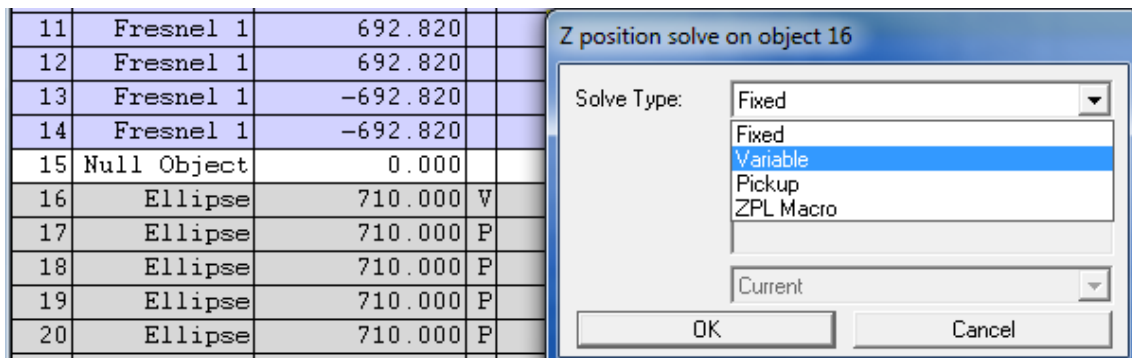


Figura 3.7 – Exemplo de parametrização de uma variável. À esquerda, na linha 16, um dos parâmetros é tomado como variável. À direita encontra-se a janela de escolha do parâmetro do objeto.

A **função de mérito** é uma representação numérica de quão perto um sistema ótico se encontra de um conjunto específico de metas. O ZEMAX® tem uma lista de operandos individualmente representados por diferentes restrições ou metas para o sistema em estudo. Os operandos têm como objetivo a manipulação de determinados parâmetros, tais como a qualidade de imagem, a distância focal, ampliação, entre muitos outros. O algoritmo de otimização (9), vai tentar reduzir o valor de função de mérito  $MF$  tanto quanto possível, e assim a função de mérito deve ser uma representação do sistema que se quer alcançar. A letra  $W$  representa o valor absoluto do operando,  $V$  o valor atual,  $T$  o valor alvo e  $i$  o índice do número do operando.

$$MF^2 = \frac{\sum_i \sum W_i (V_i - T_i)^2}{\sum_i \sum W_i} \quad (9)$$

Neste trabalho é usado o algoritmo *ortogonal descent* uma vez que este é utilizado unicamente no modo não sequencial. No editor da função de mérito é preciso sempre inicializar o operando “NSDD” com todos os parâmetros nulos para que seja feita uma limpeza de dados de memória em todos os detetores presentes no sistema. O segundo operando a adicionar é “NSTR” com os parâmetros nulos, iniciando assim o traçado de raios de todas as fontes presentes no sistema. De seguida são adicionados os operandos de restrição das variáveis dos objetos a otimizar, isto é, posicionamento, tamanho, etc. Por fim, podem ser adicionadas várias condições/metastas do detetor alvo, tais como a potência máxima/mínima absorvida, potência por unidade de área e/ou de volúmica, máximo brilho, entre outros.



### 3.1.5. Propriedades do ZEMAX®

Ao longo deste estudo foram sendo descobertas funcionalidades do programa ZEMAX® que facilitaram muito a manipulação das propriedades dos objetos, aumentando assim a produtividade do processo de otimização.

- **Objetos referenciados**

Cada objeto tem um índice que indica o número do objeto, situado na primeira coluna do editor. A coluna de referência, “*Reference Object*”, serve para referenciar espacialmente o objeto corrente a outro objeto anterior. Se “*Ref. Object*” é igual zero, as coordenadas do objeto são definidas pelas coordenadas cartesianas originais do ZEMAX®. Se “*Ref. Object*” apresenta um número diferente de zero, então o objeto a parametrizar é posicionado em relação ao objeto referenciado, sendo assim posicionados como um subconjunto. Caso o objeto de referência seja movimentado, todos os objetos referenciados a partir desse objeto também são movimentados, tornando o objeto de referência num posicionador homogeneizador.

- **Pick Ups Solve**

É uma das características de parametrização mais importantes do ZEMAX®. O “*pick up solve*” permite modificar automaticamente qualquer parâmetro de um objecto em relação a um objecto de referência. A Figura 3.8 mostra a parametrização da posição do objecto 11 no eixo. Neste caso o objecto 11 assume o valor da posição Y do objecto 1, multiplicado por um fator de escala de -0.7335 (Cosseno do ângulo  $\approx 137^\circ$ ).

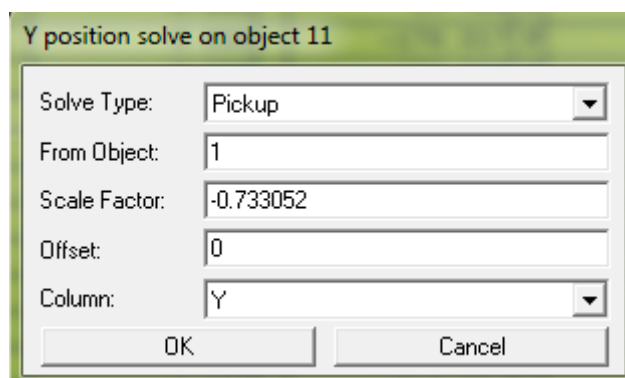


Figura 3.8 – Função pick up.

Durante o projeto, a utilização desta função simplificou bastante a otimização dos sistemas em estudo, devido principalmente à necessidade de definir conjuntos de vários objectos com parâmetros idênticos (fontes solares, lentes de Fresnel e espelhos). Assim, o tempo despendido na alteração de outras variáveis foi bastante reduzido, aumentando a velocidade e qualidade de otimização.

- **Slider**

Esta ferramenta serve para variar um parâmetro numa gama de parâmetros pré-definidos numa barra deslizante. A manipulação serve para dinamicamente visualizar o percurso ótico.



## Capítulo 4. Simulações dos fornos solares em ZEMAX®

### 4.1. Concentrador parabólico da FCT-UNL

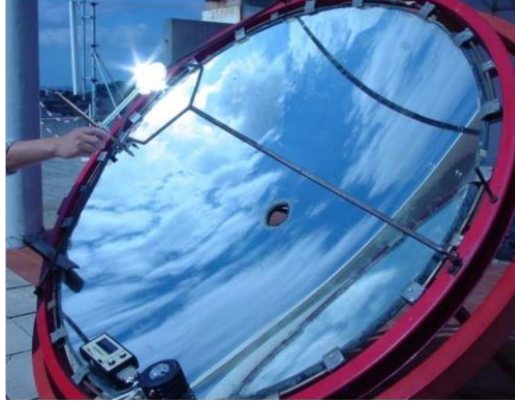


Figura 4.1 – Concentrador parabólico da FCT-UNL

#### 4.1.1. Cálculos e simulação em ZEMAX®

O concentrador utilizado neste trabalho tem uma constante de abertura de  $a = 0.38$ . Com equação (3), é calculada a sua distância focal  $f$ .

$$f = \frac{1}{4 \cdot a} = \frac{1}{4 \times 0.38} = 0.658 \cong 0.66 \text{ m} \quad (10)$$

Ou seja, o foco encontra-se na posição (0,0,0.66) m.

A potência total coletada é dada:

$$P = \eta_{\text{espelho}} \cdot I_0 \cdot A \quad (11)$$

Onde,  $\eta_{\text{espelho}}$  é a refletividade do espelho e  $A$  é a área da coleção do espelho, dada por:

$$A = \pi \cdot (x_{\text{max}})^2 = \pi \cdot (0.76)^2 = 1.82 \text{ m}^2 \quad (12)$$

$I_0$  é a irradiância solar ou fluxo energético solar, na superfície terrestre, por unidade de área. Esta é uma grandeza instável pois varia mediante as condições atmosféricas. Em dias de céu limpo, a irradiância à superfície da Terra pode oscilar entre 800 W/m<sup>2</sup> e 1000 W/m<sup>2</sup>.

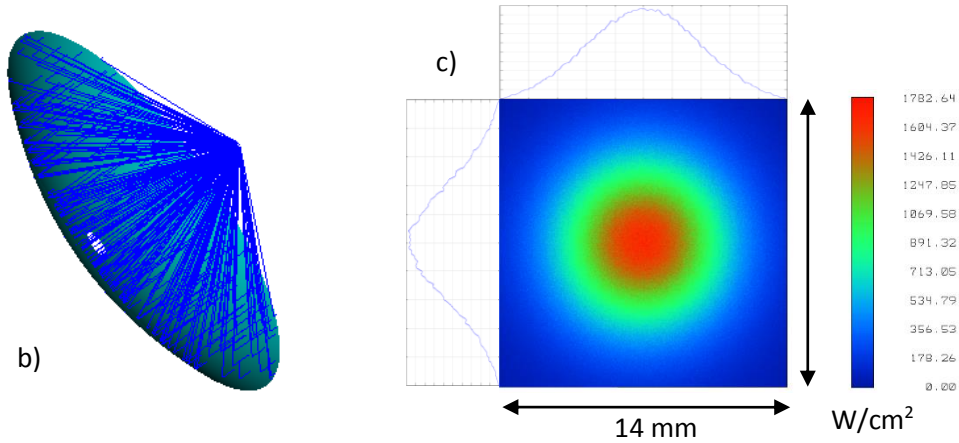
A refletividade do espelho a 64% é adotada na simulação deste forno solar (80% de reflectância do heliostato e 80% do espelho parabólico).

Considerando uma irradiância solar de 950 W/m<sup>2</sup> e substituindo este valor na equação (11), a potência total no foco é:

$$P = 1106.56 \text{ W}$$

Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z
1 Source El.	fonte	0	0	0.000	0.000	230.000	0.000	180.000	0.000
2 Aspheric	espelho da fa	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3 Detector	abs	0	0	0.000	0.000	658.000	0.000	0.000	0.000
Object Type	Material	X Half Width	Y Half Width	# X Pixels	# Y Pixels	Color	Smoothering	Scale	Plot Scale
1 Source El.	-	1000	50000000	1714.790	0	758.000	758.000	0.000	8.000E+004
2 Aspheric	MIRROR	1320.000	-1.000	760.000	0.000	0	0	0	0.000
3 Detector	ABSORB	7.000	7.000	500	500	0	0	0	0.000

a)



**Figura 4.2 – Simulação do concentrador parabólico da faculdade no ZEMAX®: a) Programação no Zemax. b) Desenho do modelo não sequencial. c) Distribuição da potência no foco e o seu fluxo.**

A potência total absorvida calculada no ZEMAX® foi de 1200 W e o pico de irradiância de no foco 17.20 W/mm<sup>2</sup>, para uma irradiância de 950 W/m<sup>2</sup> na superfície terrestre e com espelho de refletibilidade de 64% (do espelho e do heliostato).

## 4.2. Concentrador parabólico médio do PROMES-CNRS



Figura 4.3 – Concentrador solar do PROMES-CNRS em Odeillo, França.

### 4.2.1. Cálculo numérico e simulação em ZEMAX®

A distância focal deste concentrador parabólico solar é  $f = 850$  mm. Possui um diâmetro de 2 m, correspondendo a uma área de coleção de  $3.14$  m<sup>2</sup>. Para a irradiância solar na superfície terrestre de  $950$  W/m<sup>2</sup>, e considerando a reflectância total de 60% do espelho (reflectância do heliostato e concentrador parabólico), obtém-se então a potência total concentrada no foco (através da equação (12)):

$$P = 1789.8 \text{ W}$$

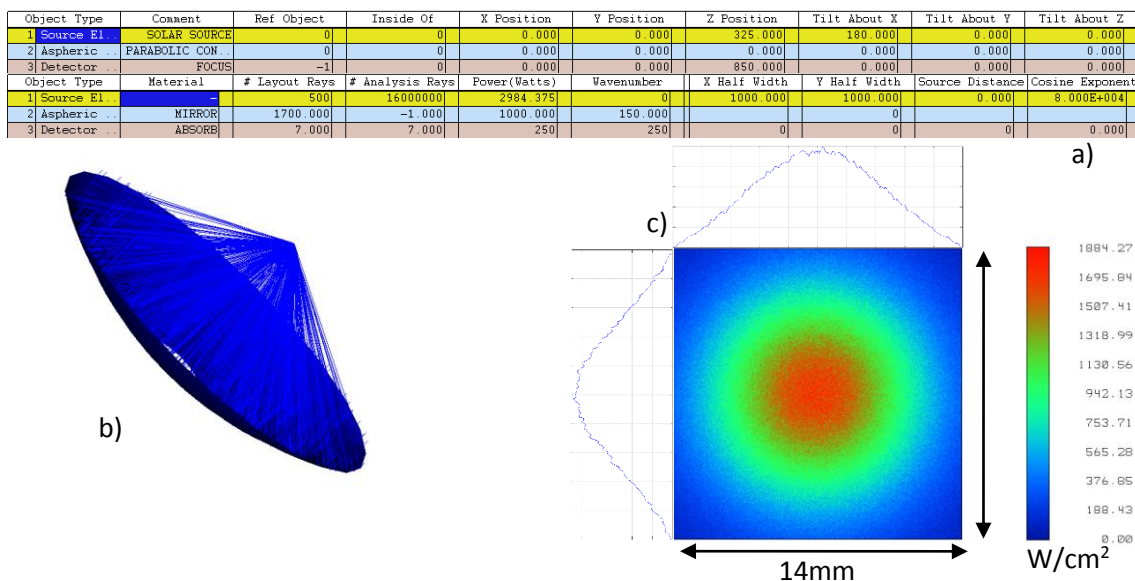


Figura 4.4 - Simulação do concentrador parabólico médio em PROMES-CNRS: a) Programação no ZEMAX®. b) Desenho do modelo não sequencial. c) Distribuição da potência no foco e respetivo fluxo.

A potência total absorvida calculada no ZEMAX® foi de  $1505$  W e o pico de irradiância no foco de  $16.02$  W/mm<sup>2</sup>, para uma irradiância superficial terrestre de  $950$  W/m<sup>2</sup>.

### 4.3. Forno solar constituído por 6 lentes de Fresnel e 6 espelhos planos (6F6E)

O forno solar de seis lentes de Fresnel e seis espelhos é um novo *design* de concentrador solar de alta potência, e o qual foi estudado neste projecto.

#### 4.3.1. Estudo individual do conjunto de 6 lentes Fresnel e 6 espelhos planos (6F6E)

Para simplificar o estudo do esquema do forno solar, é primeiramente estudado o percurso ótico da luz para apenas 1 lente de Fresnel e 1 espelho. A imagem formada pelo concentrador individual no foco é originada pela concentração dos raios solares através de uma lente Fresnel de diâmetro 0.8 m, seguido do redirecionamento da luz pelo espelho plano de alta refletividade, o qual se encontra a uma distância  $D_1$  abaixo da lente de Fresnel, com inclinação de ângulo  $\beta$ . A posição do foco encontra-se afastada 0.8 m em relação à lente de Fresnel e a uma altura  $H_1$  (Figura 4.5).

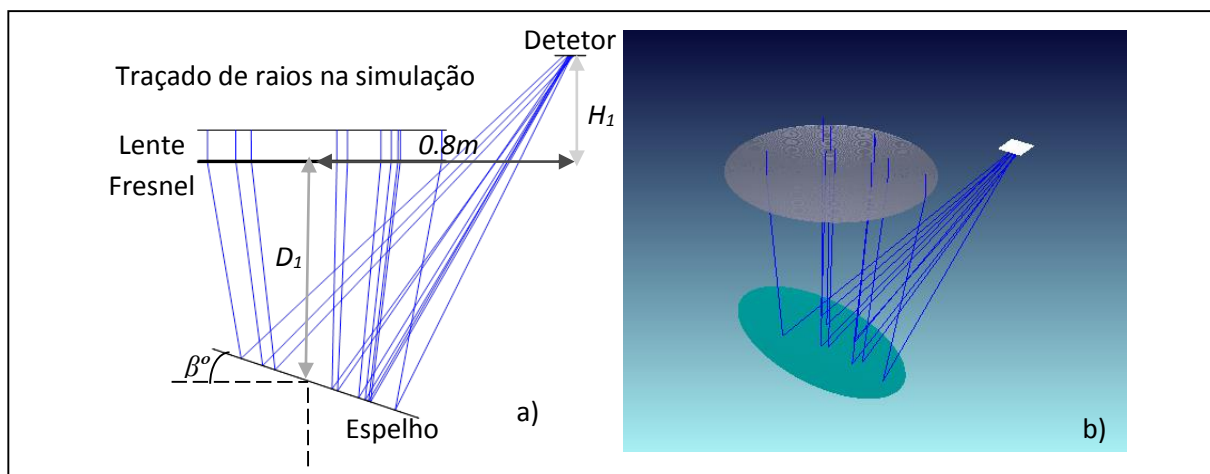


Figura 4.5 – (a) Unidade ótica do forno solar composto por a lente Fresnel e o espelho. (b) Desenho a 3D no modo não sequencial do ZEMAX<sup>®</sup>.

aterial transparente para os comprimentos de onda no visível e absorve radiação infravermelha para além dos 2200 nm e radiação ultravioleta abaixo dos 350 nm.

Os parâmetros usados para caracterizar a lente Fresnel na simulação em ZEMAX<sup>®</sup> são descritos na seguinte Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros da lente de Fresnel no ZEMAX<sup>®</sup>.

<b>Material</b>	PMMA
<b>Diâmetro</b>	0.8 m
<b>Espessura</b>	3 mm
<b>+Depth/-Freq<sup>2</sup></b>	0.5 mm
<b>Pitch °</b>	12°
<b>Conic</b>	-0.87
<b>Radius</b>	1037

<sup>2</sup> Em ZEMAX<sup>®</sup> só recebe valor de profundidade ou de frequência. Neste caso o valor é positivo com 0.5 mm de profundidade para cada ranhura.

**Distância focal**

**2.2 m**

O espelho usado na simulação tem uma refletância de 95%. Este valor é escolhido para simular espelhos reais com revestimento de alta refletância.

Considerado a irradiância solar  $I_0 = 950 \text{ W/m}^2$ , a potência de luz incidente sobre a unidade ótica é calculada pela (13), sendo a potência incidente ( $P_{\text{incidente}}$ ), o parâmetro da potência da fonte solar do ZEMAX®.

$$P_{\text{incidente}} = A_{\text{incidente}} * I_0 = \pi * 0.4^2 * 950 = 477.28 \text{ W} \quad (13)$$

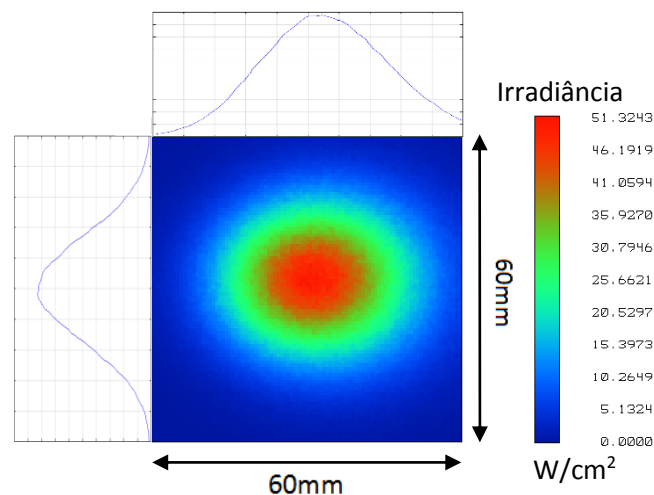
Figura 4.6 representa a programação de parâmetros no ZEMAX® do sistema ótico em estudo. Na primeira linha encontra-se programada uma fonte circular de 0.8 m de diâmetro, na posição (800, 0, 100). A segunda linha diz respeito a uma lente de Fresnel com as mesmas especificações da Tabela 6, com as coordenadas (800,0,0). Na linha 3 é programado o espelho plano, centrado na posição da lente Fresnel com a aplicação de referência, e cuja coordenada atribuída foi (0,710,0) mm. Este espelho tem uma inclinação  $\beta$  de 18.9°. Por último, na quarta linha encontra-se um detector plano na posição (0,0,347.834) mm.

Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z
1 Source El.	Source 1	0	0	800.000	100.000	0.000	90.000	0.000	0.000
2 Fresnel 1	C1	0	0	800.000	0.000	0.000	90.000	0.000	0.000
3 Ellipse	E1	-1	0	20.000	0.000	710.000	0.000	18.881	0.000
4 Detector		0	0	0.000	347.834	0.000	90.000	0.000	0.000
Object Type	Material	X Half Width	Y Half Width	# X Pixels	# Y Pixels	Data Type	Color	Smoothing	Scale
1 Source El.	-	10	10000	477.522	0	0	400.000	400.000	0.000
2 Fresnel 1	PMMA	400.000	0.000	0.500	12.000	3.000	1037.000	-0.870	0.000
3 Ellipse	MIRROR	350.000	270.000						
4 Detector	ABSORB	30.000	30.000	100	100	0	0	0	0

**Figura 4.6 – Programação do sistema no ZEMAX®.**

Nesta simulação, o fluxo máximo absorvido foi obtido recorrendo a otimização automática de função de mérito do ZEMAX®, com a variação do ângulo de rotação  $\beta$  do espelho e a altura  $H_I$  do detector plano.

A Figura 4.7 apresenta o perfil do foco produzido por 1 lente de Fresnel e 1 espelho, com a utilização de função de mérito. Foi conseguida uma potência máxima de 401 W, e um fluxo máximo de 0.51 W/mm<sup>2</sup>.



**Figura 4.7– Região do foco de uma única unidade ótica.**

#### 4.3.2. Estudo completo do sistema de 6 lentes de Fresnel e 6 espelhos planos (6F6E)

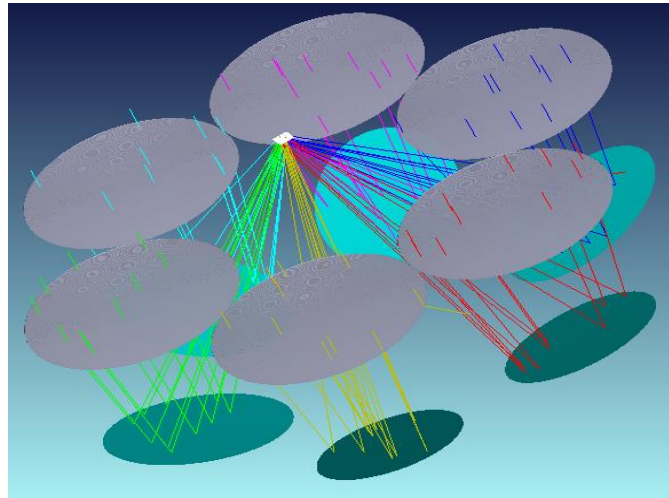


Figura 4.8 – Sistema óptico completo do forno solar 6F6E no ZEMAX®.

A Figura 4.9 representa a programação do desenho óptico otimizado para esta simulação. Os primeiros seis objetos (linhas amarelas) são as fontes de solares com posições  $x$  e  $z$  correspondentes às coordenadas dos vértices de um hexágono virtual de raio 0.8 m. As lentes de Fresnel (linhas 7 a 12) tem coordenadas  $x$  e  $z$  iguais aos da fonte, enquanto as suas posições se encontram no  $y = 0$  mm. Nas linhas 13-18 estão parametrizados os espelhos planos com forma elíptica e cujas dimensões do eixo maior  $X$  e menor  $Y$  são 700 mm e 540 mm, respetivamente. Os espelhos encontram-se distanciados 755.5 mm das respectivas lentes de Fresnel. As células “ $Z$  position” e “ $Tilt$  About  $Y$ ” do primeiro espelho estão marcadas como parâmetros de variável de otimização. São aplicados “pick ups” nas mesmas células dos outros espelhos para variarem de igual modo. O detetor é posicionado na coordenada de interseção do foco das lentes Fresnel e a sua “ $Y$  Position” é definida como uma outra variável de otimização.

Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z
1 Source El	Source 1	0	0	800.000	100.000	0.000	90.000	0.000	0.000
2 Source El	Source 1	0	0	-800.000	100.000	0.000	90.000	0.000	0.000
3 Source El	Source 1	0	0	400.000	100.000	692.820	90.000	0.000	0.000
4 Source El	Source 4	0	0	-400.000	100.000	692.820	90.000	0.000	0.000
5 Source El	Source 1	0	0	400.000	100.000	-692.820	90.000	0.000	0.000
6 Source El	Source 6	0	0	-400.000	100.000	-692.820	90.000	0.000	0.000
7 Fresnel 1	C1	0	0	800.000	0.000	0.000	90.000	0.000	0.000
8 Fresnel 1	C2	0	0	-800.000	0.000	0.000	90.000	0.000	180.000
9 Fresnel 1	C3	0	0	400.000	0.000	692.820	90.000	0.000	P 60.000
10 Fresnel 1	C4	0	0	-400.000	0.000	692.820	90.000	0.000	P 120.000
11 Fresnel 1	C5	0	0	400.000	0.000	-692.820	90.000	0.000	P -60.000
12 Fresnel 1	C6	0	0	-400.000	0.000	-692.820	90.000	0.000	P -120.000
13 Ellipse	E1	-6	0	20.000	0.000	755.156	V 0.000	17.933	V 0.000
14 Ellipse	E2	-6	0	20.000	P 0.000	755.156	P 0.000	17.933	P 0.000
15 Ellipse	E3	-6	0	20.000	P 0.000	755.156	P 0.000	17.933	P 0.000
16 Ellipse	E4	-6	0	20.000	P 0.000	755.156	P 0.000	17.933	P 0.000
17 Ellipse	E5	-6	0	20.000	P 0.000	755.156	P 0.000	17.933	P 0.000
18 Ellipse	E6	-6	0	20.000	P 0.000	755.156	P 0.000	17.933	P 0.000
19 Detector		0	0	0.000	345.854	V 0.000	90.000	0.000	0.000
Object Type	Material	X Half Width	Y Half Width	# X Pixels	# Y Pixels	Data Type	Color	Smoothering	Plot Scale
1 Source El	-	10	1000000	477.522	0	0	400.000	400.000	8.000E+004
2 Source El	-	10	1000000	477.522	0	0	400.000	400.000	8.000E+004
3 Source El	-	10	1000000	477.522	0	0	400.000	400.000	8.000E+004
4 Source El	-	10	1000000	477.522	0	0	400.000	400.000	8.000E+004
5 Source El	-	10	1000000	477.522	0	0	400.000	400.000	8.000E+004
6 Source El	-	10	1000000	477.522	0	0	400.000	400.000	8.000E+004
7 Fresnel 1	PMMA	400.000	0.000	0.500	12.000	3.000	1037.000	-0.870	0.000
8 Fresnel 1	PMMA	400.000	0.000	0.500	12.000	3.000	1037.000	-0.870	0.000
9 Fresnel 1	PMMA	400.000	0.000	0.500	12.000	3.000	1037.000	-0.870	0.000
10 Fresnel 1	PMMA	400.000	0.000	0.500	12.000	3.000	1037.000	-0.870	0.000
11 Fresnel 1	PMMA	400.000	0.000	0.500	12.000	3.000	1037.000	-0.870	0.000
12 Fresnel 1	PMMA	400.000	0.000	0.500	12.000	3.000	1037.000	-0.870	0.000
13 Ellipse	MIRROR	350.000	270.000						
14 Ellipse	MIRROR	350.000	270.000						
15 Ellipse	MIRROR	350.000	270.000	P					
16 Ellipse	MIRROR	350.000	270.000	P					
17 Ellipse	MIRROR	350.000	270.000	P					
18 Ellipse	MIRROR	350.000	270.000	P					
19 Detector	ABSORB	25.000	25.000	100	100	0	0	0	0.000

Figura 4.9 – Programação completa do sistema 6F6E no ZEMAX®.



A Figura 4.10 mostra os comandos de otimização. As linhas “BLNK” servem para escrever comentários. Na segunda linha, o operador “NSDD” serve para limpar a informação guardada nos detectores. Na linha 4, “NSTR” é a condição de inicialização do traçado de raios das fontes. As linhas 7 e 8 são linhas de condições de restrições do angulo de rotação em Y do objeto 13 (espelho), “NTYL” limita o angulo máximo (25°) e “NTLG” limita o angulo mínimo (16°). As linhas 10 e 11 restringem o movimento do detector no eixo Y (altura) do espelho, “NPYL” limita até 900 mm e “NPYG” superior a 200 mm. Nas linhas 13 e 14, são definidas as restrições da altura do detector, inferior a 450 mm e superior a 250 mm. Todos estes limites têm pesos de 0.5, ou seja prioridade de 0.5. Na primeira condição de maximização (linha 16), o “NSDD” serve para obter a potência máxima no detector 19, este apresenta parâmetros de “PIX#” = -1 e “Data” = 0. O segundo operando de “NSDD” é a condição para obter o máximo fluxo absorvido (“PIX#” = -1 e “Data” = 1). Ambas as condições de “NSDD” têm um valor de “Target” alto. Isso certifica que a resposta da função de mérito tem um valor suficientemente baixo. Na coluna de “Weight”, é favorecida a condição de fluxo absorvido, com o dobro de prioridade em relação à potência.

Oper #	Type	Surf	Det#	Fix#	Data	Target	Weight	Value	% Contrib
1	BLNK	BLNK	apagar os detectores						
2	NSDD	NSDD	1	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
3	BLNK	BLNK	ray tracing						
4	NSTR	NSTR	1	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
5	BLNK	BLNK	Restrições						
6	BLNK	BLNK	angulo do espelho						
7	NTYL	NTYL	1	13	0	25.000	0.500	25.000	0.000
8	NTYG	NTYG	1	13	0	16.000	0.500	16.000	0.000
9	BLNK	BLNK	altura dos espelhos						
10	NPYL	NPYL	1	13	0	900.000	1.000	900.000	0.000
11	NPYG	NPYG	1	13	0	200.000	1.000	0.000	0.053
12	BLNK	BLNK	altura do detector						
13	NPYL	NPYL	1	19	0	450.000	0.500	450.000	0.000
14	NPYG	NPYG	1	19	0	250.000	0.500	250.000	0.000
15	BLNK	BLNK	condicoes						
16	NSDD	NSDD	1	19	-1	5000.000	1.000	0.000	33.316
17	NSDD	NSDD	1	19	-1	5000.000	2.000	0.000	66.631

Figura 4.10 – Função de mérito do esquema 6F6E.

Após 5 ciclos de otimização, conclui-se que a inclinação ótima do espelho é  $\beta=17.3^\circ$  e a distância de  $D_I=755.5$  mm da lente de Fresnel ao espelho. O detector encontra-se situado a 345.8 mm de altura ( $H_I$ ).

Com 2 milhões de pontos de simulação em cada fonte, o resultado obtido encontra-se na Figura 4.11. A potência total encontrada no detector foi 2373 W e o fluxo absorvido de 4.74 W/mm<sup>2</sup>. O tamanho do foco é acerca de 20 mm de diâmetro.

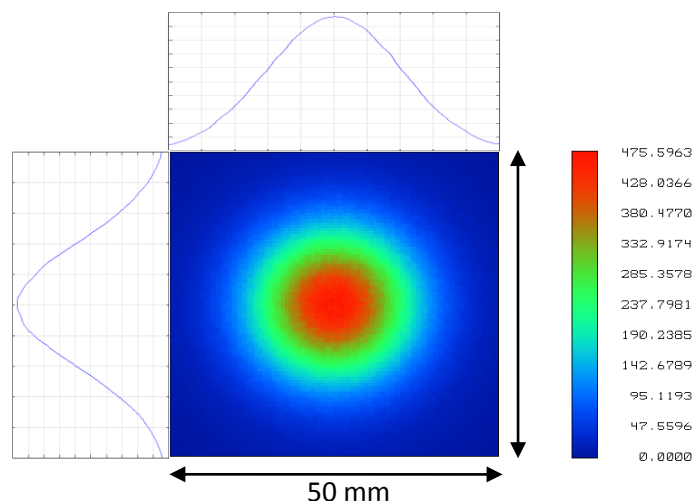


Figura 4.11- Zona do foco produzido pelo conjunto de 6 lentes de Fresnel e 6 espelhos.



## Capítulo 5. Concentrador solar constituído por 21 espelhos e 21 lentes de Fresnel (21E21F)

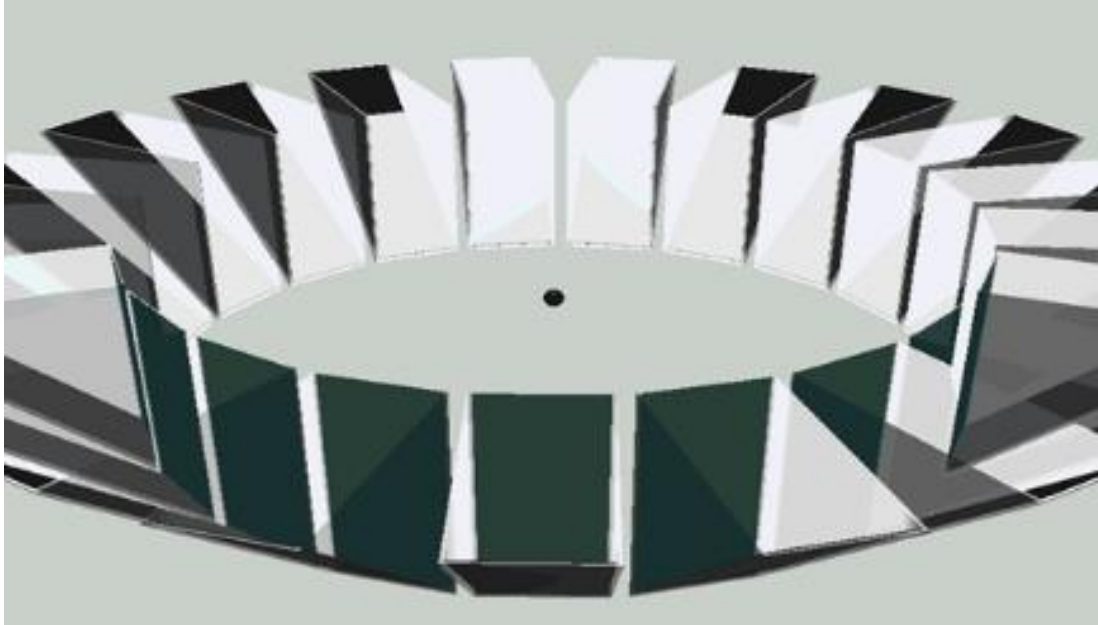


Figura 5.1 – Imagem em Autocad do concentrador solar 21E21F

### 5.1. Estudo do concentrador 21E21F

O forno solar é formado por 21 unidades óticas. Cada unidade é constituída por um espelho de dimensões  $608 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$  e uma lente Fresnel de PMMA com 3 mm de espessura e de dimensões  $430 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$ , os quais são suportados por uma peça de acrílico. As lentes de Fresnel apresentam a mesma distância focal de 770 mm. De modo a redireccionar a luz solar para a lente de Fresnel, o espelho encontra-se inclinado  $45^\circ$  em relação ao seu eixo óptico comum. O percurso ótico da unidade ótica é representado na Figura 5.2.

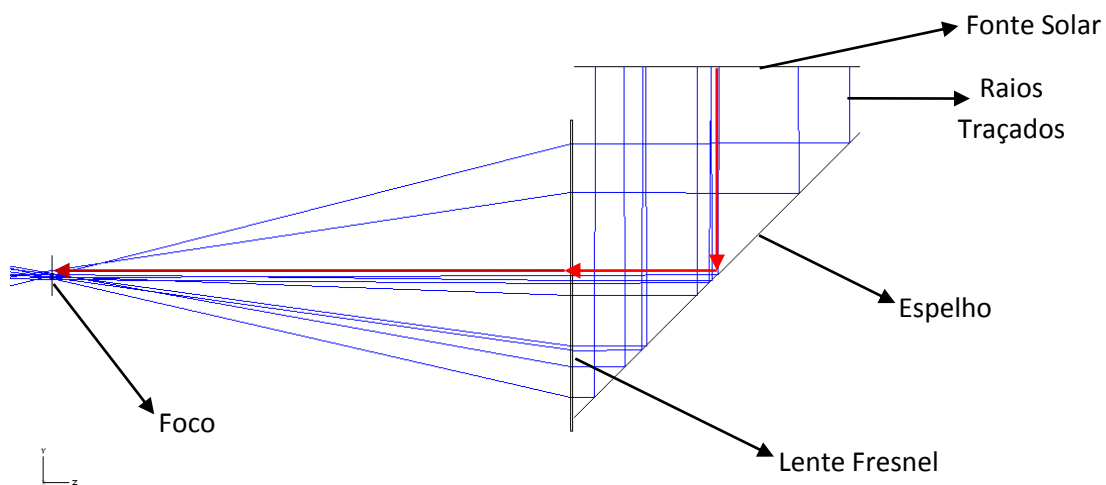


Figura 5.2- Descrição caminho ótico da unidade ótica em ZEMAX®.

O PMMA é um material termoplástico rígido e transparente. Os valores de transmissão deste material foram tidos em conta na simulação no ZEMAX® para o estudo do sistema ótico e podem ser encontrados no Anexo 2.

A escolha da lente de Fresnel para simulação foi baseada em lentes de Fresnel comercialmente disponíveis e adaptadas para a montagem deste projeto. As especificações das lentes são descritas na Tabela 7.

**Tabela 7 – Especificações da lente de Fresnel fornecida pelo fornecedor.**

Material	PMMA
Diâmetro	430 mm × 190 mm
Espessura	3 mm
+Depth/-Freq	0.5
Pitch °	12°
Distância focal	770 mm

Considerando a irradiância solar de  $I_0 = 950 \text{ W/m}^2$  e as medidas da lente, é possível simular a potência incidente sobre a unidade ótica. A radiação incidente é concentrada pela lente de Fresnel, sendo uma pequena fração desta atenuada posteriormente pela absorção do espelho.

Como não existem lentes de Fresnel de geometria retangular nos objectos do ZEMAX®, adotou-se lentes de Fresnel circulares, existentes no *software*. Para simular corretamente o percurso óptico real dos raios das lentes Fresnel rectangulares, foi colocado fontes de raios rectangulares posto por de atrás de cada lente de Fresnel, de dimensões idênticas às das lentes de Fresnel reais.

A área incidência solar, ou área de coleção, é idêntica à área da lente da Fresnel, (14).

$$A_{\text{incidente}} = A_{\text{lente}} = 0.430 * 0.190 = 0.0817 \text{ m}^2 \quad (14)$$

Então a potência incidente no espelho é dada pela (15).

$$P_{\text{incidente}} = A_{\text{incidente}} * I_0 = 0.0817 * 950 = 77.615 \text{ W} \quad (15)$$

A potência solar definida para cada fonte no ZEMAX® corresponde então ao produto entre a potência coletada pela área da lente de Fresnel e a refletividade ( $\eta$ ) do espelho:

$$\begin{aligned} P_{\text{incidente, refletida}} &= P_{\text{incidente}} * \eta_{\text{espelho}} = \\ &= 77.6 * 0.98 = 76.065 \text{ W} \end{aligned} \quad (16)$$

A Figura 5.3 mostra a programação no ZEMAX® do concentrador solar 21E21F. Foram então parametrizadas 21 fontes solares com 76.07 W de potência e de dimensões 430 mm × 190 mm. Estas fontes encontram-se igualmente distribuídas em torno de uma circunferência virtual de raio igual à

distância focal das lentes de Fresnel. As fontes solares encontram-se identificadas a partir da linha 3 até à linha 43. A distância do centro à fonte de raios é governada, e facilmente modificada, por uma única variável do objeto 1, graças à função “pick up” que torna o sistema mais robusto e simplificado. As linhas 21 a 44 são respeitantes às lentes de Fresnel. As coordenadas de cada lente respeitam as mesmas coordenadas das respetivas fontes devido ao uso de referência de objetos (a distância entre fonte e lente Fresnel é de 1 mm). Nas linhas 45 e 46 encontram-se parametrizados o concentrador parabólico da faculdade (linha 46) e respetiva fonte solar (linha 45). O foco deste concentrador poderá ser alinhado com o foco do concentrador 21F21E, gerando-se assim um forno solar de fluxo ultra elevado.

Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z
1 Rectangle		0	0	0.000	770.000	770.000	0.000	0.000	0.000
2 Fresnel 1	contr fresnel	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3 Source Re...		0	0	0.000	770.000	0.000	90.000	0.000	0.000
4 Source Re...		0	0	0.000	735.791	226.961	107.143	0.000	0.000
5 Source Re...		0	0	0.000	636.204	433.756	124.286	0.000	0.000
6 Source Re...		0	0	0.000	480.087	602.010	141.429	0.000	0.000
Object Type	Material	# Layout Rays	# Analysis Rays	Power(Watts)	Wavenumber	Color #	X Half Width	Y Half Width	Cosine Exponent
1 Rectangle		215.000	95.000						
2 Fresnel 1		235.000	0.000	0.500	12.000	3.000	395.000	-0.870	0.000
3 Source Re...	-	0	0	76.065	0	0	215.000	95.000	8.000E+004
4 Source Re...	-	0	0	76.065	0	0	215.000	95.000	8.000E+004
5 Source Re...	-	0	0	76.065	0	0	215.000	95.000	8.000E+004
6 Source Re...	-	0	0	76.065	0	0	215.000	95.000	8.000E+004
43 Fresnel 1		-21	0	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
44 Fresnel 1		-21	0	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
45 Source El...		0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	-90.000	0.000
46 Aspheric ...		0	0	-660.000	0.000	0.000	0.000	90.000	0.000
47 Detector ...		0	0	50.000	0.000	0.000	0.000	90.000	0.000
43 Fresnel 1	PMMA	235.000	0.000	0.500	12.000	3.000	395.000	-0.870	0.000
44 Fresnel 1	PMMA	235.000	0.000	0.500	12.000	3.000	395.000	-0.870	0.000
45 Source El...	-	0	0	319.450	0	0	755.000	755.000	8.000E+004
46 Aspheric ...	MIRROR	1320.000	-1.000	775.000	0.000			0	
47 Detector ...	ABSORB	10.000	10.000	100	100	0	0	0	0.000

**Figura 5.3 – Programação no Zemax® do concentrador solar 21E21F juntamente com o espelho parabólico da FCT-UNL.**

Todas estas parametrizações não são baseadas em especificações reais, não tendo sido realizada nenhuma otimização da função de mérito.

A Figura 5.4 mostra a distribuição uniforme das 21 unidades óticas ao longo de uma circunferência virtual de raio = 0.77 m. A potência total produzida pelo sistema é a soma das potências transmitidas pelas unidades óticas individuais.

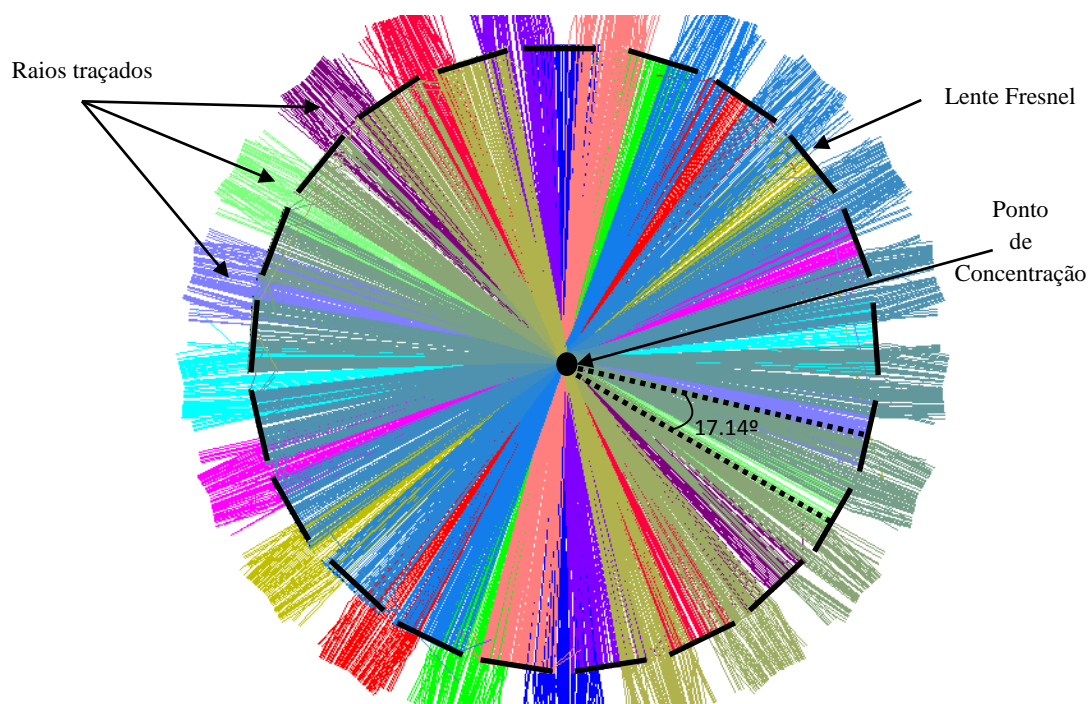


Figura 5.4- Alinhamento das 21 unidades óticas do forno solar em ZEMAX®.

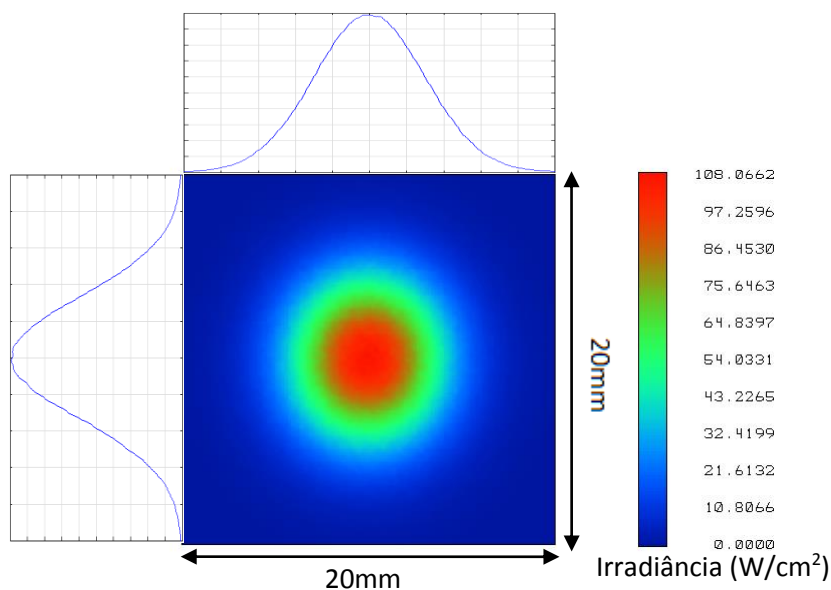


Figura 5.5- Distribuição do foco ao longo de um detetor quadrado de secção 20mm.

A Figura 5.5 apresenta o resultado da análise de distribuição da potência absorvida no foco, produzida por uma única unidade ótica. É possível observar que a distribuição no foco assemelha-se a uma distribuição gaussiana. O seu tamanho é aproximadamente 7 mm. Assim, para uma potência incidente de 76.1 W, contando com a atenuação da lente de Fresnel, o valor da potência total obtida no foco é de 65.9 W e a sua irradiação máxima de 1.3 W/mm<sup>2</sup>.

A potência total gerada pelo forno solar é então de **1384 W**.

## 5.2. Fabricação e construção das peças e montagem individual do forno solar 21E21F

Posteriormente à análise não sequencial do traçado de raios em ZEMAX<sup>®</sup> procedeu-se à construção de parte do sistema ótico. Neste capítulo é explicado a montagem experimental deste forno solar.



Figura 5.6 – Montagem de 10 unidades óticas do forno solar 21E21F.

### 5.2.1. Unidade ótica

A unidade ótica é constituída por um espelho, lente Fresnel e um suporte de acrílico.

O espelho foi inicialmente colocado no suporte de acrílico. De seguida foram efetuadas correções finas na curvatura do espelho de forma obter uma imagem circular da luz solar refletida pelo espelho, numa parede distante. Uma vez encontrado o ajuste certo, foi efetuada a colagem dos espelhos aos suportes de acrílico. As lentes de Fresnel foram posteriormente encaixadas e coladas numa das aberturas do suporte de acrílico.

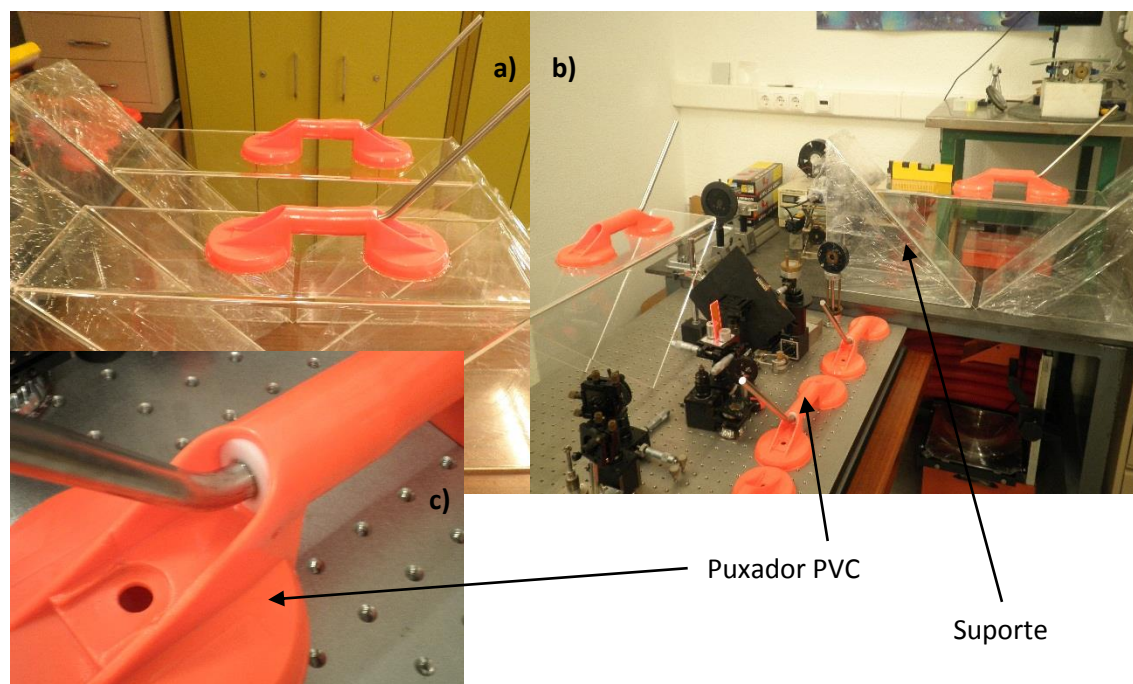
### 5.2.2. Suporte para unidade ótica

A peça de acrílico é colada a um suporte de PVC, no qual se encontra encaixado um varão de inox com 12 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento, com o auxílio de um tubo de PVC branco (Figura 5.7). A vara de inox foi previamente dobrada 45° para servir o posicionamento e montagem das unidades óticas ao suporte do espelho parabólico.

O puxador de PVC laranja foi adaptado de um sugador a vácuo de vidro, cuja zona de pega apresenta um furo de aproximadamente 24 mm. Um cilindro de PVC, com 25 mm de diâmetro, foi seccionado em 21 cilindros com 60 mm de comprimento cada, os quais foram posteriormente perfurados com uma broca de 12 mm para adaptação do varão de inox. A pega dos pexadores foi então aquecida ao longo de cerca de 60 mm para o encaixe forçado dos respetivos cilindros. Assim os puxadores ao arrefecerem conseguiam manter os cilindros bem fixados. Após o arrefecimento, os varões de inox foram



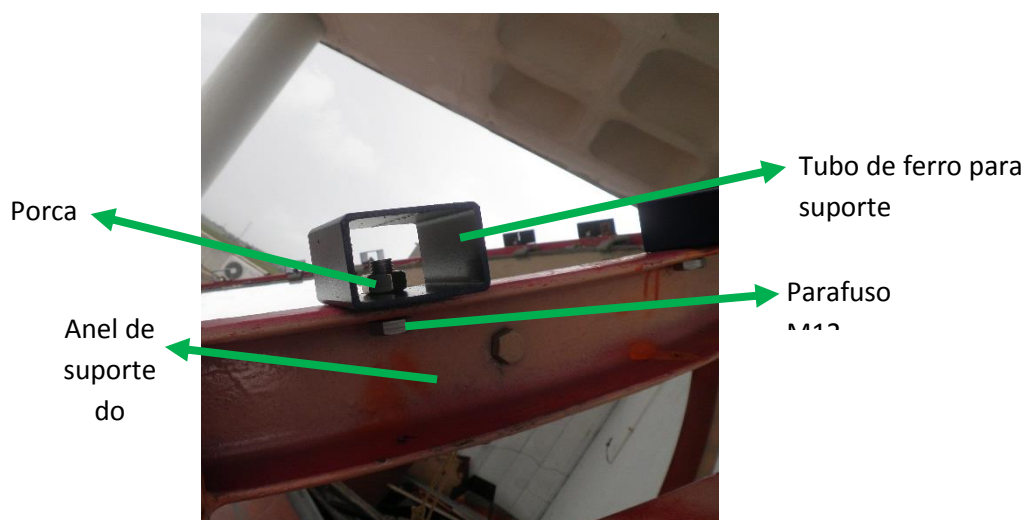
introduzidos no interior dos cilindros e fixados com cola. Assim que cada varão de inox é encaixado, este é ajustado perpendicularmente em relação à mesa óptica com o auxílio de um esquadro.



**Figura 5.7– Unidade de suporte para o acrílico depois da sua montagem: (a)(b) Fixação do puxador de PVC com varão de inox ao suporte de acrílico (c) Vista ampliada da fixação do varão no cilindro de PVC, encaixados no puxador.**

### 5.2.3. Unidade suporte base de ferro

Este suporte serve como a ligação base do sistema do forno solar de 21E21F com o concentrador parabólico existente na faculdade. É composto por um tubo de ferro rectangular com dimensões 40 mm × 60 mm × 80 mm. Em cada unidade de suporte foi feito um furo de 13 mm para a posterior fixação no suporte do espelho através de parafuso M12 e porca, como demonstrado na Figura 5.8. Para a adaptação das 21 unidades ópticas foi então necessário perfurar o anel de suporte do espelho em 21 pontos igualmente distanciados entre si.



**Figura 5.8 – Fixação da base de ferro ao anel de suporte do concentrador parabólico.**



Na Figura 5.9 é apresentada a montagem completa das 21 unidades suporte de base.



Figura 5.9 - Montagem completa do suporte de base.

#### 5.2.4. Suporte de base de torno multi-ângulo

O torno multi-ângulo consegue rodar em vários eixos (ver Figura 5.10 a), consegue rodar no sentido de “*Pitch*” com ângulo total de 95°, 360° de rotação para “*Yaw*” e 160° para “*Roll*”. Na Figura 5.10 b) mostra a capacidade de translação.

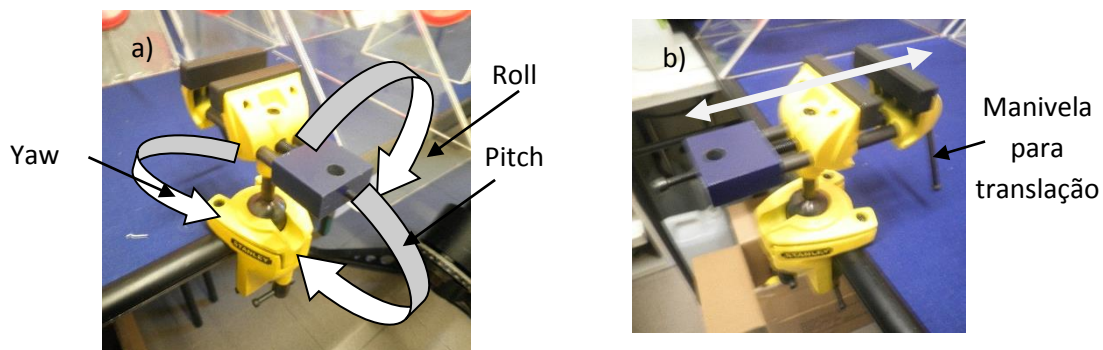


Figura 5.10 – Graus de liberdade de rotação do grampo multi-ângulos. a) Rotação e b) translação.

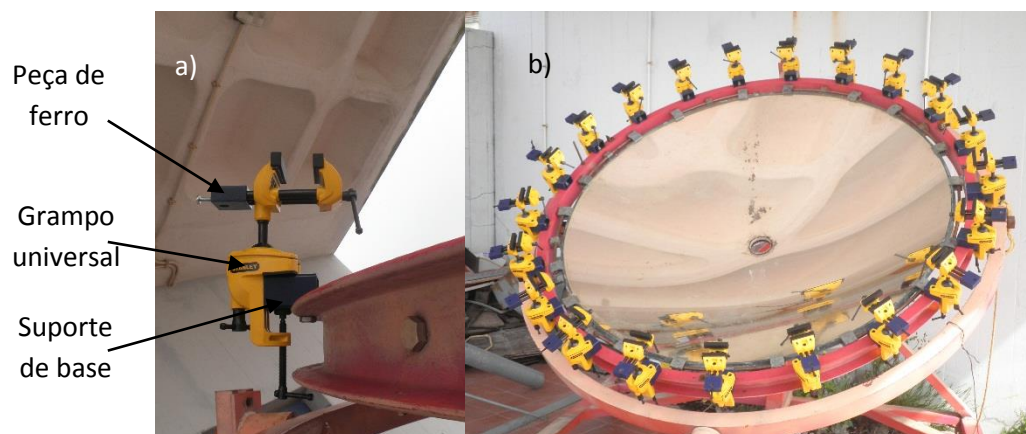
O ferro de construção furado foi cortado em pedaços idênticos com comprimento a 50 mm com a serra elétrica à uma barra de ferro de construção. Esta peça cortada foi marcada os pontos de perfuração com um paquímetro. Na peça foram perfurados 5 furos, 3 para encaixar na cabeça do grampo, e outros dois para o suporte da peça de acrílico da unidade ótica. Após a perfuração procedeu-se à limpeza da peça de ferro, e foi pintado com *spray* para impedir a ferrugem. Ver Figura 5.11.



Figura 5.11 - Peça de aço de construção cortado para suporte de torno multi-ângulo.

Esta peça foi encaixada com cola na parte superior do grampo no lado inverso da garra. Figura 5.12 a).

A Figura 5.12 apresenta a montagem da unidade de suporte de base de ferro de construção com o torno multi angulo.



**Figura 5.12 – Unidade suporte de grampo multi-ângulo. a) Unidade de suporte de grampo multi-ângulo com peça de aço de construção cortado. b) Montagem completa do suporte de torno multi ângulos.**

### 5.3. Montagem e experiências preliminares do forno solar 21E21F

#### 5.3.1. Montagem experimental

A montagem foi efetuada num dia com sol. Primeiro aparafusou-se as unidades de suporte de base nos respectivos furos do anel de suporte do concentrador parabólico. De seguida, foi grampado a unidade de torno multi angulo à unidade de suporte de base. Uma vez firmemente grampado foi encaixado o varrão de aço inox da unidade de suporte de acrílico no furo da peça de ferro e trancado com um parafuso em estrela de diâmetro 5 mm.

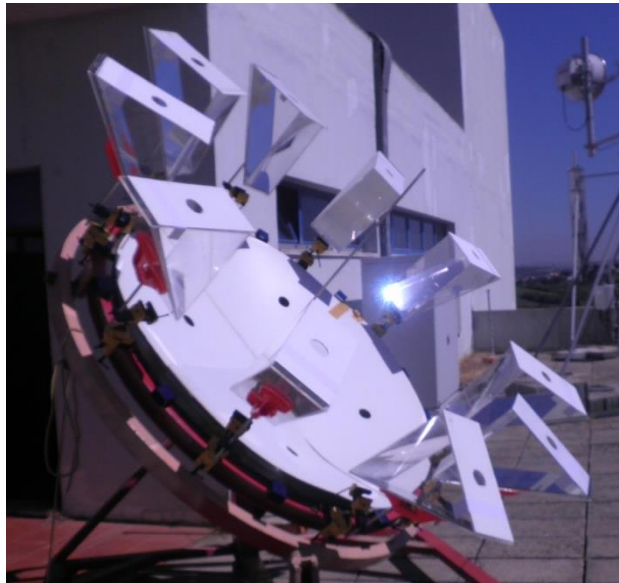


Figura 5.13 – Montagem de 10 unidades óticas com os respectivos suporte.

#### 5.3.2. Ensaios experimentais

O ensaio experimental tem um ponto crítico no alinhamento da unidade ótica. O método de alinhamento da unidade ótica do forno solar 21E21F consiste na utilização do foco do concentrador parabólico como ponto de referência. Para tal, optou-se por um sistema de alinhamento que consistiu em tapar parcialmente o concentrador parabólico com um cartão circular de 4 furos (Figura 5.13). O foco de referência é identificado com um pedaço de papel, sendo a sobreposição das quatro imagens produzida pela reflexão dos quatros furos. A condição de alinhamento é a sobreposição do foco da unidade ótica com o foco de referência do espelho parabólico, Figura 5.14.

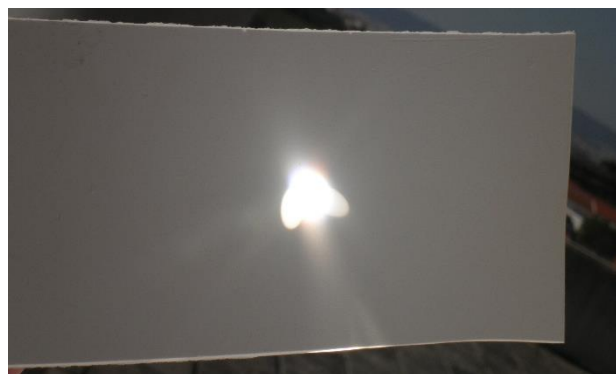


Figura 5.14- Condição de alinhamento da unidade ótica, o círculo mais brilhante pertence à imagem da unidade ótica e as imagens elípticas são do concentrador parabólico.



## 5.4. Tabela dos custos

Tabela 8 – Custo do protótipo.

Materiais	Custos € /u	Quantidade u
Lentes de Fresnel	30	21
Espelho plano	40	21
Suporte de Acrílico	65	21
Trono multi angulo	47	21
Ferro de construção 2 m	20	1
Tubo de ferro 2 m	20	1
Cola	3	40
Varrão de aço inox 6 m	40	1
Sugador a vácuo de vidro	10	21
Cilindro de PVC 1 m	20	1
Total		4252 €



## Capítulo 6. Aplicações a laser com fornos solar com lentes de Fresnel

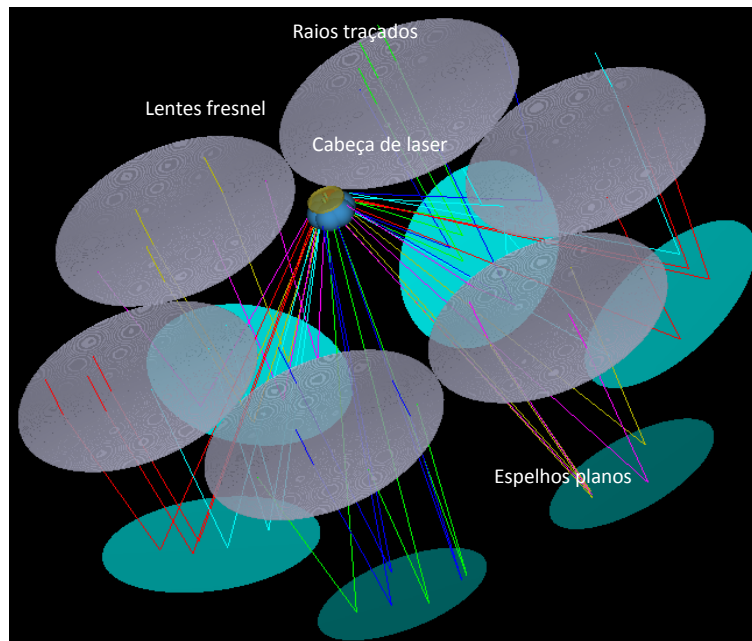


Figura 6.1 - Forno solar 6F6E para bombeamento do disco laser solar.

### 6.1. Introdução

#### 6.1.1. Laser

O LASER, acrónimo de “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” é um instrumento de grande utilidade em diversas áreas, nomeadamente, na indústria, na investigação científica, na medicina e outras, devendo-se este interesse ao facto de o laser possuir características únicas em relação a outras fontes luminosas.

Uma das principais características de um laser é o facto de a luz ser monocromática, ou seja, a emissão de radiação dá-se numa banda muito estreita que se pode considerar que o feixe emitido possui apenas um comprimento de onda.

Também a baixa divergência do feixe emergente (na ordem dos mili-radianos) e o brilho (potência emitida por unidade de área) constituem características importantes do laser. De seguida será introduzida uma pequena introdução teórica sobre laser e o material ativo Nd:YAG. [9]

##### 6.1.1.1. Princípio físico

Os sistemas atómicos apenas podem existir em estados discretos de energia.

Quando uma partícula absorve ou emite radiação, ocorre uma transição de estado quântico do sistema. A frequência do fóton emitido ou absorvido é dada pela relação de Plank:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu_{21} \quad (17)$$

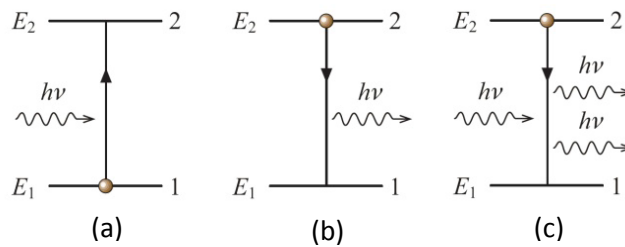
Sendo  $E_2$  e  $E_1$ , respetivamente as energias dos estados final e inicial,  $h$  a constante de Planck e  $\nu_{21}$  a frequência do fóton emitido ou absorvido pelo sistema.

No equilíbrio térmico, o estado de menor energia é o mais densamente povoado, tal como é previsto pela estatística de Boltzmann. Tem então de ser fornecida energia para que os eletrões passem de um nível de energia inferior para outro superior. Considerando um meio onde existem apenas dois estados não degenerados de energia, com populações  $N_1$  e  $N_2$ , o número total de partículas mantém-se:

$$N_1 + N_2 = N_{total} \quad (18)$$

Onde os níveis de energia estão separados por intervalo de acordo com a relação de Plank (17) sendo possível a transição radiativa entre os níveis 1 e 2.

Esta transição pode ser efetuada de vários modos, dependendo do sentido da transição e da forma como ocorre. Os processos de transição entre níveis de energia encontram-se ilustrados na Figura 6.2.



**Figura 6.2– Processo de transição. (a) Absorção, (b) emissão espontânea e (c) emissão estimulada**

### Absorção

Quando uma onda eletromagnética com frequência  $\nu_{21}$  passa através de um sistema atômico onde pode ocorrer uma transição de energia  $h\nu_{21}$ , a população do nível inferior diminui a uma taxa que depende do número de partículas no nível  $N_1$  e da densidade de radiação  $\rho(\nu)$ , logo:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -B_{12}\rho(\nu)N_1 \quad (19)$$

Onde  $B_{12}$  é uma constante de proporcionalidade com dimensões  $[cm^3/s^2]$ . O fator  $B_{12}\rho(\nu)$  é a probabilidade de ocorrer uma transição induzida pelo efeito de um campo exterior por unidade de tempo.

### Emissão espontânea

Quando um átomo atinge o nível superior por absorção, a população desse estado decai espontaneamente para o nível 1 de menor energia, a uma taxa de transição proporcional à população  $N_2$  do nível superior:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -A_{21}N_2 \quad (20)$$

Onde  $A_{21}$  é uma constante de proporcionalidade com dimensões de frequência  $[s^{-1}]$  representa uma probabilidade de transição que está diretamente relacionado com o tempo de vida no estado excitado. Tem o nome de probabilidade de transição espontânea porque o coeficiente  $A_{21}$  representa a probabilidade de um átomo no nível 2, espontaneamente, transitar para o nível 1 por unidade de tempo.



O elétron regressará ao estado fundamental, radiando energia em termos de quanta, mesmo na ausência de um campo eletromagnético.

### Emissão estimulada

Além da transição espontânea, existe uma outra forma de um átomo excitado radiar energia e transitar para um nível de energia inferior. Este processo tem o nome de emissão estimulada, sendo esta provocada pela influência do campo exterior no meio ativo. Esta radiação é responsável pela emissão laser. A taxa de transição é dada pela relação:

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -B_{21}\rho(v_{21})N_2 \quad (21)$$

Onde  $B_{21}$  é uma constante de proporcionalidade com as mesmas dimensões de  $B_{12}$  da (19). Neste caso, no entanto, a taxa de transição depende da densidade de radiação  $\rho(v_{21})$  apenas para uma gama de frequências muito limitada. Sendo idealmente apenas para a frequência de transição  $2 \rightarrow 1$ . Verifica-se assim que a radiação emitida pelo átomo e o campo eletromagnético que estimula a transição estão fortemente relacionados. Combinando as (19), (21) e (22) obtém-se, partindo da equação de conservação (18):

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -\frac{\partial N_2}{\partial t} = B_{21}\rho(v_{21})N_2 - B_{12}\rho(v_{12})N_1 + A_{21}N_2 \quad (22)$$

No equilíbrio térmico:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -\frac{\partial N_2}{\partial t} = 0 \quad (23)$$

Pela relação da (22), pode se escrever na forma:

$$B_{21}\rho(v_{21})N_2 + A_{21}N_2 = B_{12}\rho(v_{12})N_1 \quad (24)$$

Onde os termos do primeiro membro da equação correspondem à emissão espontânea e estimulada e o termo do segundo membro refere-se à absorção.

Para um sistema em equilíbrio térmico com dois níveis de energia com  $N_1$  e  $N_2$  números de partículas, energias  $E_1$  e  $E_2$  e degenerescência  $g_1$  e  $g_2$ , a razão entre os dois níveis populacionais vem dada pela razão de Boltzmann:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp \left[ \frac{-(E_2 - E_1)}{kT} \right] \quad (25)$$

Reescrevendo a (24):

$$\rho(v_{21}) = \frac{(A_{21}/B_{21})}{(g_1/g_2)(B_{12}/B_{21}) \exp \left( \frac{hv_{21}}{kT} \right) - 1} \quad (26)$$

Unindo esta expressão com a lei da radiação do corpo negro:

$$\rho(v) \partial v = \frac{8\pi v^2 \partial v}{c^3} \frac{hv}{e^{hv/kT} - 1} \quad (27)$$

Então é verificado:

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi v^2 \partial v}{c^3} \quad (28)$$

$$B_{21} = \frac{g_1}{g_2} B_{12} \quad (29)$$

$$A_{21} = \frac{1}{\tau_{21}} \quad (30)$$

Sendo estas relações conhecidas como coeficientes de Einstein. Quando não existe degenerescência dos níveis ou quando essa degenerescência é igual, verifica-se que  $B_{21} = B_{12}$ . A emissão estimulada garante uma amplificação de sinal que provoca a emissão laser, ou seja, os fótons guardam as propriedades dos fótons estimulantes.

Essa relação tem características muito particulares, tais como: polarização idênticas, frequência idênticas, mesma direção e coerência espacial (mesma fase) já que, a informação dos campos magnéticos antes e depois de interagirem como meio ativo mantém-se inalterada, provocando apenas uma amplificação de sinal que está na origem do próprio laser.

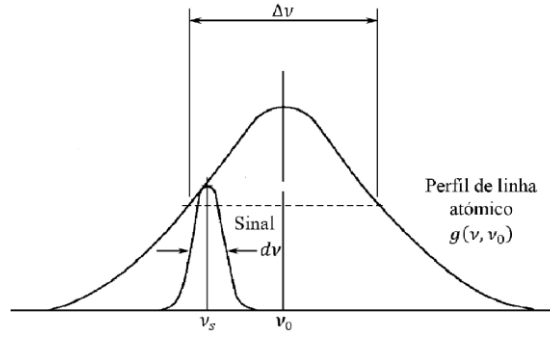
### Absorção e ganho ótico

Considerando as populações de dois níveis de energia  $N_1$  e  $N_2$ , sendo o estado fundamental e o estado excitado representados respetivamente pelo nível 1 e 2 e desprezando em (22) a emissão espontânea obtemos:

$$-\frac{\partial N_1}{\partial t} = B_{21}\rho(v) \left( \frac{g_2}{g_1} N_1 - N_2 \right) \quad (31)$$

Sendo esta equação obtida considerando níveis de energia muito próximos, separados por uma energia  $v_{21}$  e uma onda monocromática de frequência  $v_{21}$ .

Considerando agora os dois níveis definidos pela sua largura de linha, com energia de separação centrada em  $v_0$ , com largura de banda a meia altura  $\Delta v$  caracterizada por  $g(v, v_0)$ , e um sinal de frequência centrado em  $v_s$  e largura de banda  $dv$ , pode-se observar na Figura 6.3:



**Figura 6.3 - Largura de linha de uma transição atômica centrada em  $v_0$  e em sinal de banda estreita centrado em  $v_s$ .**

Sendo  $N_1$  e  $N_2$  o número total de átomos no nível 1 e 2 respectivamente, então o número de átomos capaz de interagir com a radiação de frequência  $v_s$  e largura de banda  $dv$  é dado por:

$$\left(\frac{g_2}{g_1}N_1 - N_2\right)g(v, v_0)dv \quad (32)$$

A variação do número de átomos no nível 1 de energia pode ser expressa em termos da densidade de energia,  $g(v)dv$  se multiplicar em ambos os lados da anterior equação pela energia dos fótons  $h\nu$  e se dividir pelo volume  $V$ . Passando as populações  $N_1$  e  $N_2$  a serem designadas por densidades populacionais, respectivamente  $n_1$  e  $n_2$ , a (31) virá:

$$-\frac{\partial(\rho(v_s)dv)}{\partial t} = \rho(v_s)dv B_{21}h\nu g(v_s, v_0) \left(\frac{g_2}{g_1}N_1 - N_2\right) \quad (33)$$

Esta expressão fornece informação sobre a taxa líquida de absorção de energia num determinado intervalo de frequência  $dv$  centrada em  $v_s$ . Integrando a equação anterior em  $dv$  e, sabendo que o sinal viaja através do material de espessura  $dx$  num intervalo de tempo  $dt = dv/c$ , então, à medida que a onda avança de  $x$  para  $x + dx$ , a energia do feixe decresce de acordo com:

$$-\frac{\partial(\rho(v_s))}{\partial x} = \rho(v_s)B_{21}h\nu g(v_s, v_0) \left(\frac{g_2}{g_1}n_1 - n_2\right) \frac{1}{c} \quad (34)$$

Integrando esta equação:

$$\frac{\rho(v_s)}{\rho_0(v_s)} = \exp \left[ -B_{21}h\nu_s g(v_s, v_0) \left(\frac{g_2}{g_1}n_1 - n_2\right) \frac{x}{c} \right] \quad (35)$$

Introduzindo o coeficiente de absorção:

$$\alpha(v_s) = \left(\frac{g_2}{g_1}n_1 - n_2\right) \sigma_{21}(v_s) \quad (36)$$

E

$$\sigma_{21}(v_s) = \frac{B_{21}h\nu_s g(v_s, v_0)}{c} \quad (37)$$

É a seção eficaz da transição  $2 \rightarrow 1$ . Então, a (35) é reduzida a:

$$\rho(v_s) = \rho_0(v_s)\exp[-\alpha(v_s)x] \quad (38)$$

A expressão anterior é designada de equação de absorção nas condições de equilíbrio térmico, onde  $n_1(g_2/g_1) > n_2$ . A energia da radiação decresce exponencialmente com a profundidade de penetração dentro da substância. A absorção máxima possível ocorre quando todos os átomos se encontram no estado fundamental. Para uma população de estados energéticos idêntica [ $n_1(g_2/g_1) = n_2$ ] a absorção é eliminada e o material é transparente. Finalmente, quando  $n_1(g_2/g_1) < n_2$ , verifica-se uma amplificação do sinal.

### 6.1.1.2. Inversão de população

De acordo com a distribuição de Boltzmann, em equilíbrio térmico existem sempre menos átomos no nível excitado do que no nível de mais baixa energia. Então, a diferença de populações  $N_1 - N_2$  é sempre positiva, o que significa que o coeficiente de absorção  $\alpha(v_s)$  em (36) é positivo, e a radiação incidente é absorvida, tal como se pode observar na Figura 6.4 a).

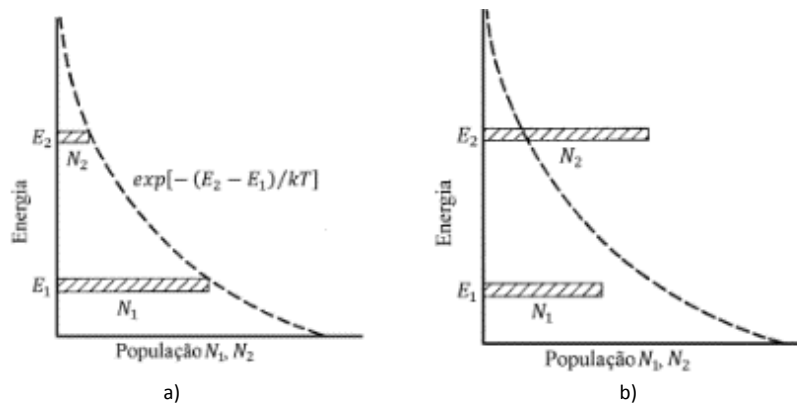


Figura 6.4 - População relativa em dois níveis energéticos para (a) equilíbrio térmico e (b) inversão de população.

Supondo que seria possível alcançar uma situação em que, temporariamente, existam mais átomos no nível superior do que no nível inferior, a diferença de população nessa transição tornar-se-ia negativa, ou seja,  $N_1 < N_2$ , então  $\alpha(v_s)$  seria também negativo, pelo que ocorreria uma amplificação do sinal introduzido, já que a absorção de radiação incidente daria origem à emissão estimulada. A condição necessária para se verificar amplificação é então a existência de que num determinado instante, existam mais átomos num estado excitado do que no estado fundamental (Figura 6.4 b) ou seja:

$$N_1 < N_2 \quad \text{caso} \quad E_1 < E_2$$

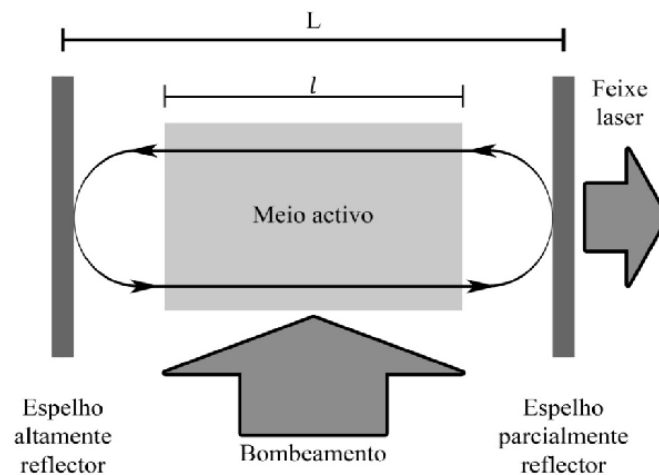
Sendo esta condição, a condição de inversão de população.

A absorção e emissão estimulada são processos paralelos, que ocorrem sempre lado a lado independentemente da distribuição de população ao longo dos níveis energéticos. À medida que a população do nível superior decresce em relação à do nível inferior, o número de transições de absorção aumenta em relação ao de transições de emissão, verificando-se assim uma diminuição de radiação.

Quando as densidades populacionais de ambos os estados são idênticas, o número de emissões torna-se igual ao número de absorções, tornando-se o material transparente à radiação. À medida que a população do nível superior se torna maior do que a do nível inferior, o processo de emissão estimulada predomina e a radiação aumenta coletivamente durante a passagem pelo meio amplificador. Para se atingir a inversão de população é então necessário possuir uma fonte de energia capaz de povoar o nível superior. A esta energia dá-se o nome de energia de bombeamento.

### 6.1.1.3. Oscilador laser

Um oscilador laser consiste essencialmente em dois componentes: o amplificador ótico e a cavidade de ressonância.



**Figura 6.5 – Cavidade de ressonância.**

A cavidade de ressonância é composta geralmente por dois (ou mais) espelhos parametrizados de uma forma específica (ângulo, distância, curvatura e reflectância) em relação ao meio ativo. A energia de bombeamento inverte a população eletrónica do meio ativo, originando o armazenamento de energia no nível de energia mais alto. Os componentes da cavidade são parametrizados de forma a proporcionar um retorno parcial da energia emitida pelo meio ativo para o interior do mesmo várias vezes, potenciando os processos de emissão espontânea e estimulada. Quando se verifica o efeito de emissão espontânea e se a energia que retorna ao sistema (*feedback*) for suficiente para compensar as perdas internas do sistema, acontece a amplificação e o sistema começa a oscilar.

### 6.1.2. Laser Nd:YAG

O laser de Nd:YAG (Neodymium-Doped Yttrium Aluminum Garnet) é de longe o mais comum dos lasers de estado sólido. O Nd:YAG possui uma combinação de propriedades favoráveis únicas de operação laser. O anfitrião YAG é duro, possui boas qualidades óticas e tem uma largura de linha fluorescente estreita, resultando disso um alto ganho e baixo limite energético para operação laser.

### 6.1.2.1. Propriedade física do Nd:YAG

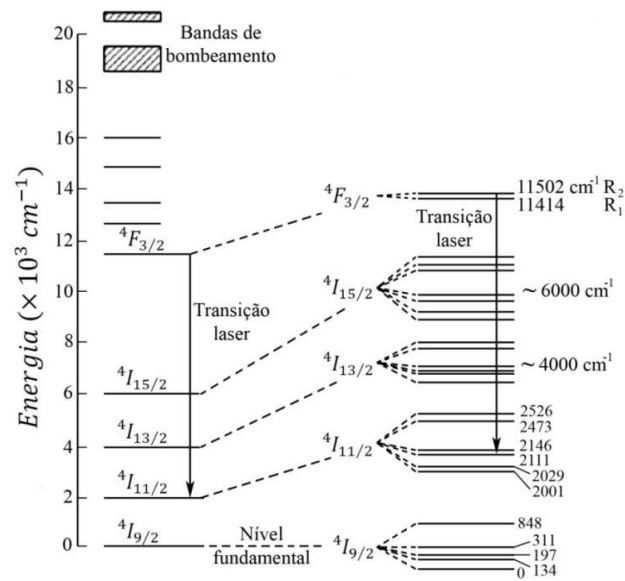
A estrutura cristalina anfitriã do Nd:YAG é notória pela mistura das suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. A estrutura do YAG é estável desde a temperatura mais baixa até à sua temperatura de fusão, não tendo sido observadas alterações da sua estrutura na fase sólida. Apesar do YAG apresentar menor força e rigidez que a do rubi, procedimentos normais de fabrico não produzem problemas de fratura sérios.

**Tabela 9** - Parâmetros espectroscópicos do Nd:YAG a 300 K [10]

Parâmetro (unidades)	Nd:YAG
Comprimento de onda de bombeamento, $\lambda_p$ (nm)	808 <sup>3</sup>
Pico da secção eficaz de absorção, $\sigma_p$ (E-20cm <sup>2</sup> )	6,7
Largura de banda de absorção, $\Delta\lambda_p$ (nm)	<4
Densidade de saturação de absorção, $\phi_p$ (kW/cm <sup>2</sup> )	12
Densidade mínima de bombeamento, $I_{min}$ (kW/cm <sup>2</sup> )	~0
Comprimento de onda de emissão laser, $\lambda_l$ (nm)	1064
Pico da secção eficaz de emissão laser, $\sigma_l$ (E-20cm <sup>2</sup> )	28
Largura de banda de emissão laser, $\Delta\lambda_l$ (nm)	~0,6
Fluência de saturação de emissão laser, $\Gamma_{l,sat}$ (J/cm <sup>2</sup> )	0,6
Densidade de saturação de emissão laser, $\phi_l$ (kW/cm <sup>2</sup> )	2,6
Tempo de vida do estado excitado, $\tau$ (mseg)	0,26
Defeito quântico	0,24

A Figura 6.6 apresenta o diagrama detalhado dos 4 níveis de energia para ião neodímio no YAG, com a sua principal transição de laser. [11]

<sup>3</sup> Comprimento de onda principal utilizado para bombeamento com diodo. No bombeamento com sol o espectro de absorção do Nd:YAG é estimulado por espectro solar.



**Figura 6.6 – Diagrama detalhado dos níveis de energia para o íon neodímio no YAG indicando a principal transição de laser.**

Em condições normais de operação, a oscilação laser mais forte do Nd:YAG ocorre com comprimentos de onda de 1.0641  $\mu\text{m}$ , resultado da transição entre os níveis  $^4F_{3/2}$  e  $^4I_{11/2}$ . Porém, também resulta emissão laser da transição entre os níveis  $^4F_{3/2}$  e  $^4I_{13/2}$  mas apenas com décimo da intensidade de transição.

### 6.1.2.2. Absorção do Nd:YAG

A absorção do material laser depende da relação entre o espectro de absorção com o espectro de emissão da fonte usada. Este é um fator muito importante e determinante para a sua eficiência. Para o caso do laser solar, ao usar um cristal de Nd:YAG há uma correlação entre o espectro de absorção do cristal e o espectro de emissão do Sol na superfície da terrestre. Na Figura 6.7 encontra-se ilustrado a sobreposição do espectro de emissão solar e o espectro de absorção do Nd:YAG [12]:

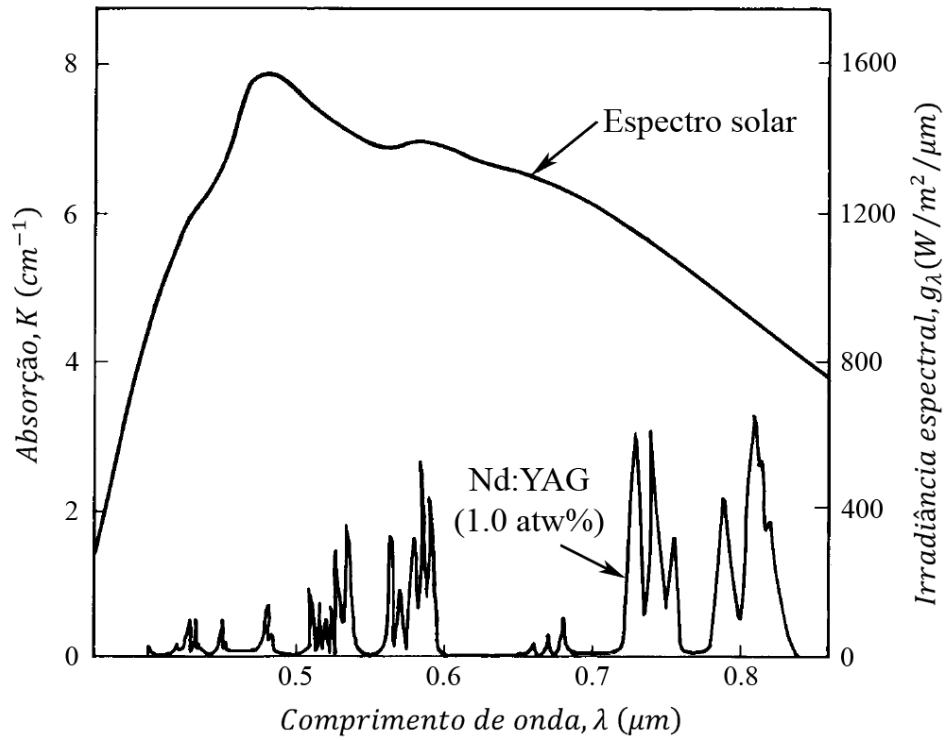


Figura 6.7 – Espectro de emissão solar e espectro de absorção do Nd:YAG



## 6.2. Sistema de bombeamento do laser 6F6E6S

O esquema de bombeamento solar de disco laser [23-25] é apresentado na **Error! Reference source not found.**, este é estimulado através do forno solar 6F6E. O bombeamento contínuo pode ser atingido com a montagem num seguidor de dois eixos que segue o movimento do sol. A radiação solar incidente é coletada e concentrada pelas lentes de Fresnel, refletida pelos espelhos e por fim focada na cabeça de laser. (Figura 6.8).

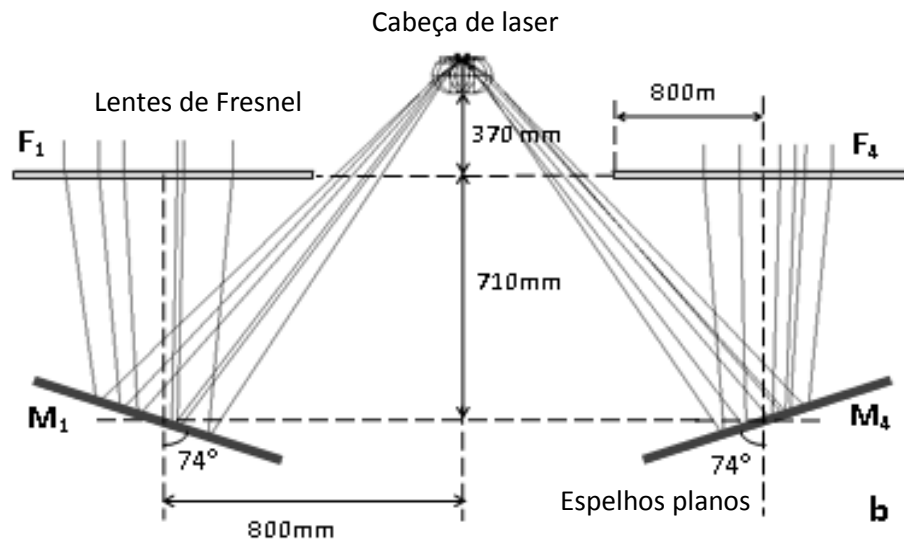
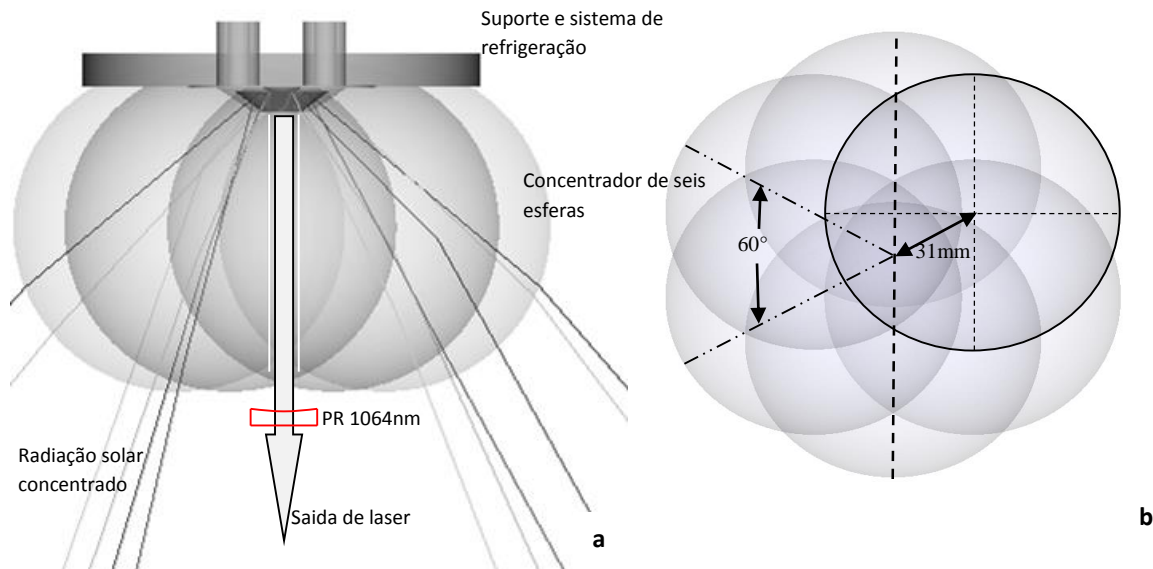


Figura 6.8 – Vista lateral do percurso óptico do sistema de bombeamento de laser.

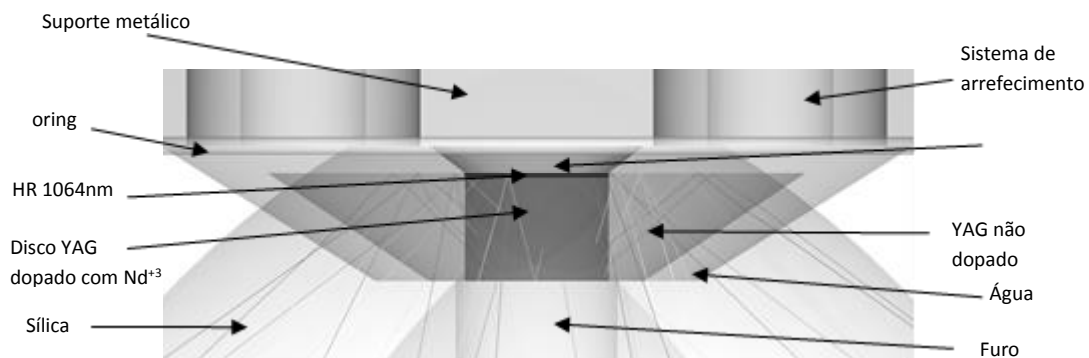
A cabeça de laser é constituída por um concentrador secundário de seis faces de esfera de sílica fundida juntamente com disco de laser estado sólido de formato cônico e o sistema de arrefecimento à água, Figura 6.9 a).

O concentrador secundário de seis faces de esferas em sílica fundida é constituído por seis esferas de 100 mm diâmetro, desfasadas 31 mm em relação ao centro e com  $60^\circ$  de diferença de ângulos. Figura 6.9 b). A curvatura da face esférica ajuda a concentrar ainda mais a luz proveniente de cada unidade ótica. A sílica fundida é o material ótico ideal para o bombeamento de luz ao Nd:YAG uma vez que é transparente para o espetro absorção do Nd:YAG. A sílica fundida é também um material de alto ponto de fusão que é importante na prevenção do sobre aquecimento da estrutura mecânica do laser devido ao alto fluxo de energia solar no foco.



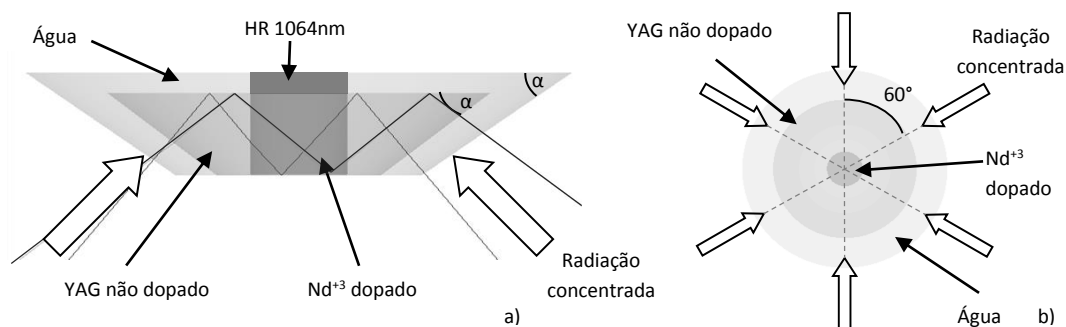
**Figura 6.9 – (a) Vista frontal do concentrador secundário. (b) Vista superior do concentrador secundário de seis faces esféricas de sílica.**

Um furo cônico é perfurado dentro do concentrador para a instalação do disco laser de forma cônica, Figura 6.10. Ambas as faces superior e laterais do disco laser são arrefecidas com água, e no entanto a superfície inferior é fixado no concentrador com cola ótica. Na parte superior do núcleo dopado encontra-se um refletor de revestimento de HR 1064 nm, e fora do concentrador um revestimento PR 1064 nm. Um furo no meio do concentrador é perfurado para deixar sair o laser. A cavidade de laser é formado pelo HR 1064 nm e o output coupler, na Figura 6.9 a) e Figura 6.10.



**Figura 6.10– Cavidade para o disco de laser solar de estado solido e os respectivos suportes mecânicos e sistema de arrefecimento.**

O disco de laser estado sólido de YAG/Nd:YAG tem diâmetro total de 28 mm de diâmetro, tendo a região central dopada Nd<sup>3+</sup> 8 mm de diâmetro. Este disco com forma cônica com ângulo de abertura  $\alpha^\circ$  serve de propósito para receber a luz incidente e obter multi passagem de luz no núcleo dopado através do efeito de reflexão total interna, ver Figura 6.11 a). Com a utilização do forno solar 6F6E como sistema de bombeamento, a luz entra no centro do cristal com a diferença de 60°. Figura 6.11 b).



**Figura 6.11 – (a) Vista lateral do compósito de Nd:YAG/YAG disco laser com o arrefecimento por água, e o percurso ótico de bombeamento. (b) Vista superior do compósito de Nd:YAG/YAG e respetivo direção de bombeamento.**

### 6.2.1. Simulação do laser de 6F6E6S em ZEMAX®.

A Figura 6.12 mostra a simulação completa para o laser de disco no forno solar 6F6E com o concentrador secundário de seis faces de esferas de sílica fundida e o mecanismo de arrefecimento. As primeiras 18 linhas são as linhas do concentrador solar 6F6E (já previamente estudado). A potência de incidente das fontes foram ajustadas para a potência útil de absorção do Nd:YAG, com 16 % <sup>4</sup> da potência solar inicial.

As linhas 19 a 26 constituem o concentrador secundário, formado por seis esferas em sílica de 100 mm de diâmetro. Na parametrização das esferas estão presentes duas variáveis chaves para maximizar a potência de saída do laser, sendo estas a posição relativa do centro das esferas ao centro do concentrador secundário e a altura das esferas.

Todos os objetos depois da linha 26 são liderados pelo objeto da linha 26 (devido ao uso das referências), desta forma a altura do componente de laser é parametrizado como uma variável de otimização. A linha 26 é a água (componente de arrefecimento para o cristal); linha 27 o material não dopado do disco laser; linhas 28 e 29 são espelhos anelares de alta reflexão situadas na parte superior e inferior do material cristal não dopado; linha 30 é o detetor volumico com mesmo material do cristal não dopado; linha 31 é o cristal dopado de Nd<sup>3+</sup>; linha 32 é o furo de saída do laser (material- ar). As dimensões do cristal não dopado têm sempre 1.5 mm de espaço inferior às dimensões da água, assegurando assim o fluxo de refrigeração para o cristal. Linhas 34 a 40 são objetos de desenho de mecânica que não entram em conta na simulação. Sendo estas o suporte de encaixe, cilindros de entrada e saída da água, a respetiva mecânica de adaptação dos tubos de água, e por fim um oring.

<sup>4</sup> É a percentagem de sobreposição do espectro de emissão solar com espectro de absorção do Nd:YAG

Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z
1 Source El...	Source 1	0	0	800.000	1.000	0.000	90.000	0.000	0.000
2 Source El...	Source 1	0	0	-800.000	1.000	0.000	90.000	0.000	0.000
3 Source El...	Source 1	0	0	400.000	1.000	692.820	90.000	0.000	0.000
4 Source El...	Source 4	0	0	-400.000	1.000	692.820	90.000	0.000	0.000
5 Source El...	Source 1	0	0	400.000	1.000	-692.820	90.000	0.000	0.000
6 Source El...	Source 6	0	0	-400.000	1.000	-692.820	90.000	0.000	0.000
7 Fresnel 1	C1	0	0	800.000	0.000	0.000	90.000	0.000	0.000
8 Fresnel 1	C2	0	0	-800.000	0.000	0.000	90.000	0.000	180.000
9 Fresnel 1	C3	0	0	400.000	0.000	692.820	90.000	0.000	F 60.000
10 Fresnel 1	C4	0	0	-400.000	0.000	692.820	90.000	0.000	F 120.000
11 Fresnel 1	C5	0	0	400.000	0.000	-692.820	90.000	0.000	F -60.000
12 Fresnel 1	C6	0	0	-400.000	0.000	-692.820	90.000	0.000	F -120.000
13 Ellipse	E1	-6	0	20.000	0.000	710.000	0.000	18.554	V 0.000
14 Ellipse	E2	-6	0	20.000	P 0.000	710.000	P 0.000	18.554	F 0.000
15 Ellipse	E3	-6	0	20.000	P 0.000	710.000	P 0.000	18.554	F 0.000
16 Ellipse	E4	-6	0	20.000	P 0.000	710.000	P 0.000	18.554	F 0.000
17 Ellipse	E5	-6	0	20.000	P 0.000	710.000	P 0.000	18.554	F 0.000
18 Ellipse	E6	-6	0	20.000	P 0.000	710.000	P 0.000	18.554	F 0.000
19 Sphere	S1	0	0	30.937	V 270.000	V 0.000	P 0.000	0.000	0.000
20 Sphere	S2	0	0	15.469	P 270.000	P 26.792	P 0.000	0.000	0.000
21 Sphere	S3	0	0	-15.469	P 270.000	P 26.792	P 0.000	0.000	0.000
22 Sphere	S4	0	0	-30.937	P 270.000	P 0.000	P 0.000	0.000	0.000
23 Sphere	S5	0	0	-15.469	P 270.000	P -26.792	P 0.000	0.000	0.000
24 Sphere	S6	0	0	15.469	P 270.000	P -26.792	P 0.000	0.000	0.000
Object Type	Material	X Half Width	Y Half Width	Z Half Length	# X Pixels	# Y Pixels	# Z Pixels	Data Type	Smoothering
1 Source El...	-	3	500000000	88.000	0	0	400.000	400.000	8.000E+004
2 Source El...	-	3	500000000	88.000	P 0	0	400.000	400.000	8.000E+004
3 Source El...	-	3	500000000	88.000	P 0	0	400.000	400.000	8.000E+004
4 Source El...	-	3	500000000	88.000	P 0	0	400.000	400.000	8.000E+004
5 Source El...	-	3	500000000	88.000	P 0	0	400.000	400.000	8.000E+004
6 Source El...	-	3	500000000	88.000	P 0	0	400.000	400.000	8.000E+004
7 Fresnel 1	PMMA	400.000	0.000	0.500	12.000	3.000	1037.000	-0.870	0.000
8 Fresnel 1	PMMA	400.000	P 0.000	0.500	P 12.000	P 3.000	P 1037.000	P -0.870	P 0.000
9 Fresnel 1	PMMA	400.000	P 0.000	0.500	P 12.000	P 3.000	P 1037.000	P -0.870	P 0.000
10 Fresnel 1	PMMA	400.000	P 0.000	0.500	P 12.000	P 3.000	P 1037.000	P -0.870	P 0.000
11 Fresnel 1	PMMA	400.000	P 0.000	0.500	P 12.000	P 3.000	P 1037.000	P -0.870	P 0.000
12 Fresnel 1	PMMA	400.000	P 0.000	0.500	P 12.000	P 3.000	P 1037.000	P -0.870	P 0.000
13 Ellipse	MIRROR	350.000	270.000						
14 Ellipse	MIRROR	350.000	270.000						
15 Ellipse	MIRROR	350.000	P 270.000	P					
16 Ellipse	MIRROR	350.000	P 270.000	P					
17 Ellipse	MIRROR	350.000	P 270.000	P					
18 Ellipse	MIRROR	350.000	P 270.000	P					
19 Sphere	SILICA	50.000	1						
20 Sphere	SILICA	50.000	P 1						
21 Sphere	SILICA	50.000	P 1						
22 Sphere	SILICA	50.000	P 1						
23 Sphere	SILICA	50.000	P 1						
24 Sphere	SILICA	50.000	P 1						
Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z
26 Cylinder ..	agua	0	0	0.000	305.268	V 0.000	-90.000	0.000	0.000
27 Cylinder ..	material dopado	-1	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
28 Ellipse	reflector	-2	0	0.000	0.000	6.000	P 0.000	0.000	0.000
29 Ellipse	reflector	-3	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30 Detector ..	detector	-4	0	0.000	0.000	3.000	0.000	0.000	0.000
31 Cylinder ..	nd:yag	-1	0	0.000	0.000	-3.000	P 0.000	0.000	0.000
32 Cylinder ..	vacuo	-6	0	0.000	0.000	0.000	180.000	0.000	0.000
33 Null Object		0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
34 Cylinder ..	tampa	-8	0	0.000	0.000	7.500	P 0.000	0.000	0.000
35 Cylinder ..	tampa ligacao	-1	0	0.000	0.000	0.000	0.000	180.000	0.000
36 Cylinder ..	agua entrada	-2	0	13.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
37 Cylinder ..	agua saida	-3	0	-13.000	P 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
38 Cylinder ..	ligacao agua	-2	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
39 Cylinder ..	ligacao agua	-2	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
40 Torus Vol ..		-6	0	0.000	0.000	0.000	90.000	0.000	0.000
Object Type	Material	Par 1(used)	Par 2(used)	Par 3(used)	Par 4(used)	Par 5(used)	Par 6(used)	Par 7(used)	Par 9(used)
26 Cylinder ..	WATER	9.000	7.500	21.000					
27 Cylinder ..	S-LAM60M	6.000	P 6.000	P 15.000	P				
28 Ellipse	MIRROR	15.000	P 15.000	P					
29 Ellipse	MIRROR	6.000	P 6.000	P					
30 Detector ..	S-LAM60M	4.000	4.000	P 3.000	P 150	150	20	0	0
31 Cylinder ..	NDYAG	4.000	P 6.000	P 4.000	P				
32 Cylinder ..	VACUUM	4.500	P 78.000	P 4.500	P				
33 Null Object	-								
34 Cylinder ..	MIRROR	60.000	P 10.000	P 60.000	P				
35 Cylinder ..	MIRROR	6.000	1.500	4.000					
36 Cylinder ..	WATER	3.500	20.000	P 3.500	P				
37 Cylinder ..	WATER	3.500	20.000	P 3.500	P				
38 Cylinder ..	MIRROR	6.500	P 20.000	P 6.500	P				
39 Cylinder ..	MIRROR	6.500	P 20.000	P 6.500	P				
40 Torus Vol ..	ACRYLIC	28.000	0.500	0.000	360.000				

Figura 6.12 – Programação em ZEMAX® de laser com forno solar 6F6E.

A Figura 6.13 apresenta a função de mérito de otimização do ZEMAX®. Os primeiros 8 operandos são as mesmas do forno solar 6F6E. Novas restrições são adicionadas para maximizar a potência de saída do laser. É otimizado a distância das esferas em relação ao centro com operando 10 e 11; posição relativa em altura das esferas usando os operandos 13 e 14; posição relativa em altura dos componentes de laser com os operandos 16 e 17. O último operando é a condição do detector para maximizar o total do fluxo absorvido por unidade de volume, definido com “Pix#” a 0 e “Data” a 2.

Oper #	Type	Surf	Det#	Fix#	Data	Target	Weight	Value	% Contrib
1	BLNK	BLNK	apagar os detectores						
2	NSDD	NSDD	1	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
3	BLNK	BLNK	ray tracing						
4	NSTR	NSTR	1	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
5	BLNK	BLNK	Restrições						
6	BLNK	BLNK	restricao do angulo do espelho						
7	NTYL	NTYL	1	16	0	20.000	0.500	20.000	0.000
8	NTYG	NTYG	1	16	0	15.000	0.500	15.000	0.000
9	BLNK	BLNK	distancias entre as esferas em relacao ao centro						
10	NPXL	NPXL	1	23	0	35.000	0.500	35.000	0.000
11	NPYG	NPYG	1	23	0	20.000	0.500	20.000	0.000
12	BLNK	BLNK	posicao de Y das esferas						
13	NPYL	NPYL	1	23	0	320.000	0.500	320.000	0.000
14	NPYG	NPYG	1	23	0	250.000	0.500	250.000	0.000
15	BLNK	BLNK	posicao em Y das componentes de laser						
16	NPYL	NPYL	1	30	0	320.000	0.500	320.000	0.000
17	NPYG	NPYG	1	30	0	280.000	0.500	280.000	0.000
18	BLNK	BLNK	condição de maximizacao						
19	NSDD	NSDD	1	34	0	2.500E+004	1.000	0.000	100.000

Figura 6.13 – Otimização em ZEMAX® da simulação do laser.

### 6.2.2. Análise numérica do disco laser de Nd:YAG em ZEMAX®

Após várias horas de simulação de otimização para obter os melhores parâmetros otimizados, o perfil de absorção do cristal com a maior potência absorvida simulada é observável na Figura 6.14.

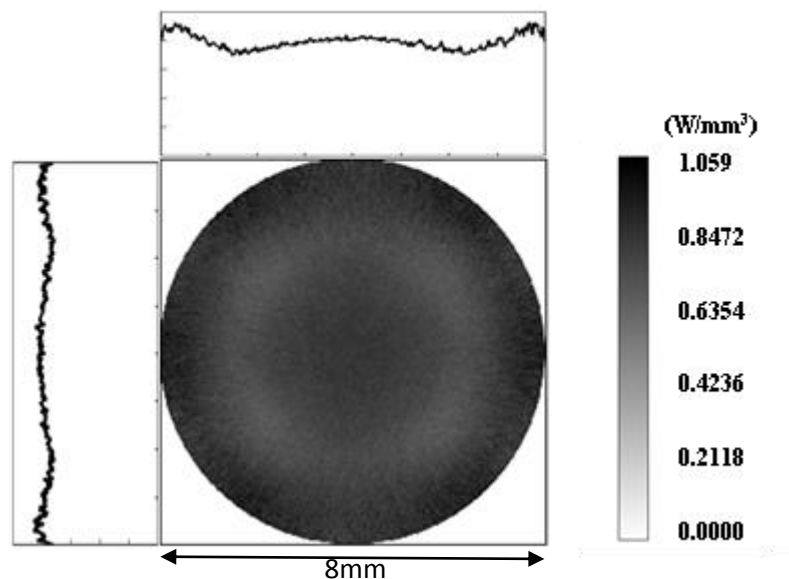


Figura 6.14 - Perfil absorção de bombeamento do disco fina laser de Nd:YAG

Como observado na Figura 6.15, a potência mais alta atingível foi 72 W para o disco com região ativa de diâmetro 8 mm. A potência de laser tem tendência em aumentar a sua potência com o aumento do diâmetro, e no entanto o ultimo diâmetro apresenta uma diminuição da potência de saída do laser. Os discos com ângulos  $\alpha$  de 33.7° e 36.8° apresentam as maiores potências de laser, no entanto devido às restrições mecânicas de contato da superfície inferior do cristal com o segundo concentrador, não foi possível obter dados para diâmetros do ganho superior a 8 mm.

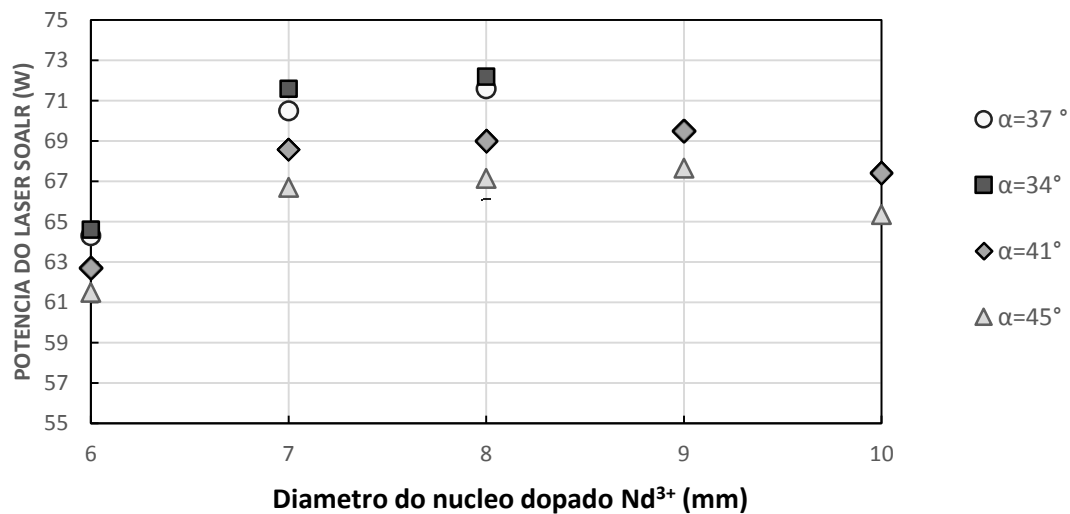


Figura 6.15 – Potência de laser solar para diferentes diâmetros do disco fino e ângulo de inclinação da face lateral do disco composto.

#### 6.2.2.1. Análise numérica do LASCAD®

Com o uso do *software* LASCAD® foram calculados numericamente os parâmetros da cavidade de ressonância. Foi então adoptada uma cavidade com 400 mm de comprimento total, com -5 m RoC (raio de curvatura concava de -5 m) de output coupler com 95% de reflectibilidade para HR e PR. A Figura 6.16 a) mostra a variação da potência de saída do laser em função do “output mirror” como espelho de saída de laser. Na Figura 6.16 b) representa a potência de saída do laser em função da potência absorvida. O fator de qualidade calculado tem parâmetros de qualidade de feixe de  $M_x^2 = 16.6$  e  $M_y^2 = 16.7$  e um brilho de  $B=0.26$  W.

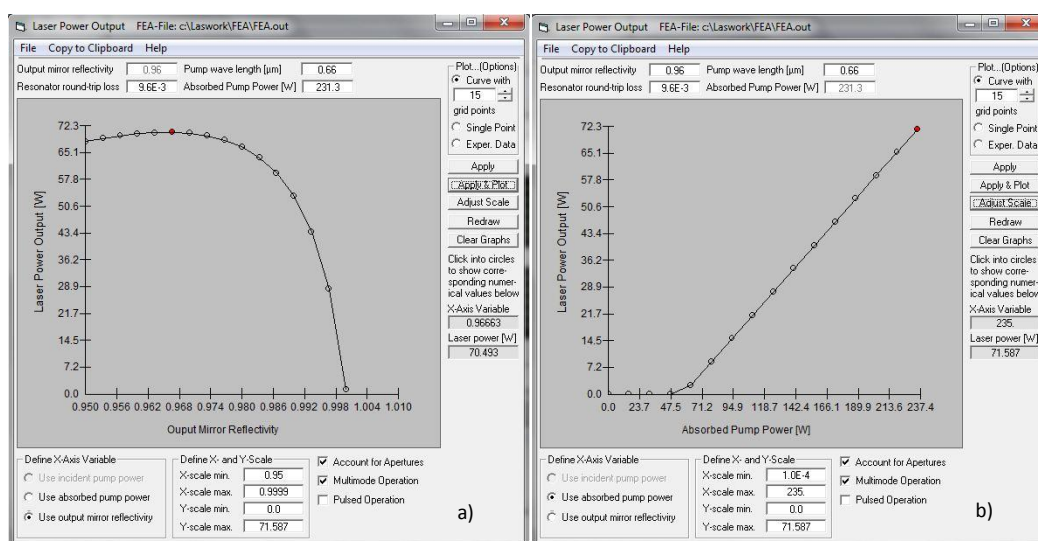
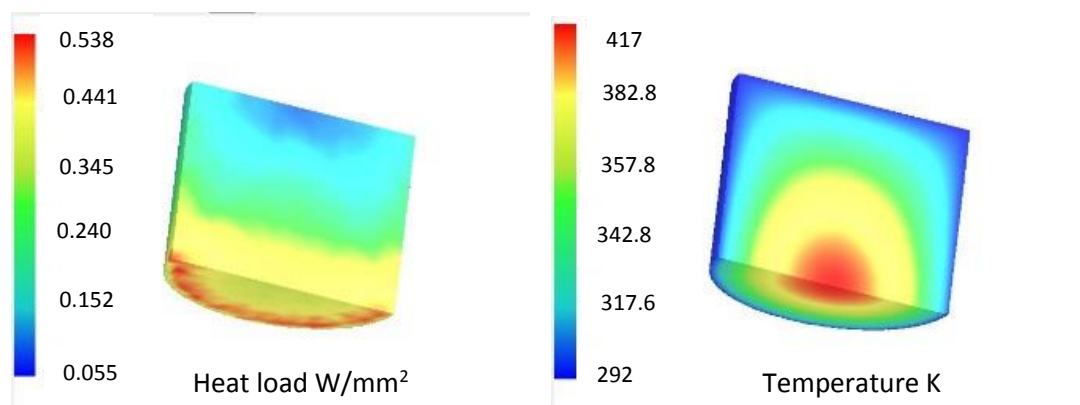


Figura 6.16– (a) Potência do laser em função da refletibilidade dos outputs coupler. (b) Potência de laser em função da potência absorvida.

A qualidade de feixe depende largamente da temperatura armazenada no material ativo. A Figura 6.17 (a) mostra a densidade do calor e Figura 6.17 (b) a temperatura na região ativa do disco.



**Figura 6.17– (a) Carga de calor no ganho meio activo do disco de laser dopado de  $\text{Nd}^{3+}$ . (b) Distribuição de temperatura do ganho medio do cristal do disco.**





## Capítulo 7. Discussão de resultados, conclusão e perspectivas futura.

Nesta tese foram propostos dois novos tipos de fornos solares de alta temperatura. Os desempenhos destes fornos solares foram simulados através da análise de traçados de raios não sequenciais do ZEMAX® com otimização de função de mérito para obter os melhores resultados. De um dos fornos - forno 21E21F - foi construído um protótipo preliminar.

Os fornos solares estudados são formados por lentes de Fresnel e apesar da sua aberração cromática e a capacidade inferior de focagem em relação aos concentradores parabólicos, os resultados podem ser muito satisfatório, tal como observado na Tabela 10. O forno solar 6F6E apresenta a maior potência recolhida no foco. No caso do forno solar de 21E21F, a soma dos 21 focos supera a potência do espelho parabólico da faculdade.

**Tabela 10 – Resultado das simulações dos fornos solares no ZEMAX® com irradiância solar de 950 W/m².**

Fornos	Potencia (W)	Fluxo (W/mm2)	Temperatura Equivalente K	Diâmetro do foco (mm)
Concentrador médio da Franca	1500	16.00	4100	14
Concentrador da faculdade	1200	17.20	4170	10
6F6E	2378	4.74	3024	20
21E21F	1381	1.30	2188	7
Concentrador da faculdade+ 21E21F	3180	17.20	~4300	~12

Estes novos fornos solares são leves em comparação com os fornos de espelhos parabólicos. E são mais baratos e mais fácil de adquirir do que os espelhos parabólicos.

O sistema de bombeamento de laser com o forno solar 6F6E6S obteve 72.2 W de laser e com uma eficiência de coleção de 24.1 W. Com estes resultados foi possível publicar um manuscrito. (Anexo 5)

O processo de desenvolvimento científico e técnico nunca tem fim. O uso de novas ideias ou materiais pode sempre impulsionar o melhoramento de novos sistemas de fornos solares ou até mesmo de lasers. Para o trabalho de laser de disco 6F6E6S fica pendente uma implementação real do sistema a fim de produzir laser. Também o uso do forno solar 6F6E com seguidor automático para outros fins.



## Capítulo 8. Referência bibliográfica

- [1] H. P. Garg, “Solar Energy: Fundamentals and Applications,” Tata McGraw-Hill Education, 2000.
- [2] C. viva, “Ciência viva,” [Online]. Available: <http://www.cienciaviva.pt/rede/himalaya/home/pirelioforo.asp>. [Acedido em 2 5 2013].
- [3] Wikipedia, Wikipedia, [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/F%C3%A9lix\\_Trombe](http://en.wikipedia.org/wiki/F%C3%A9lix_Trombe). [Acedido em 2 5 2013].
- [4] PROMES-CNRS, PROMES-CNRS, [Online]. Available: <http://www.promes.cnrs.fr/index.php?page=mega-watt-solar-furnace>. [Acedido em 3 5 2013].
- [5] “Sun,” [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solar/sun.html>.
- [6] R. Winston, J. Miñano e P. Benítez, “Nonimaging Optics,” 2004.
- [7] C. G. Young, “A sun pumped cw one-watt laser,” *Appl. Opt.* 5(6), pp. 993-997, 1966.
- [8] Zemax, Zemax Manual, Zemax Development Corporation.
- [9] A. E. Siegman, Lasers, CA: science Books, 1986.
- [10] W. koechner e M. Bass, “Solid-State Lasers: A Graduate Text, Springer-Verlag,” 2003.
- [11] W. F. Krupke, “Ytterbium solid-state lasers - the first decade,” *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 6, nº 6, p. 1287, 2000.
- [12] B. Zhao, C. Zhao, J. He e S. Yang, “The Study of Active Medium for Solar-Pumped Solid-State Lasers,” *Acta Opt. Sin.*, nº 10, pp. 1-9, 2006.
- [13] G. Herranz e G. P. Rodríguez, “Uses of Concentrated Solar Energy”.
- [14] G. A. Madhugiri e S. R. Karale, “High solar energy concentration with a Fresnel lens: A Review,” vol. 2, nº 3, 2012.
- [15] R. John Koshel e I. A. Walmsley, “Non-edge-ray design: improved optical pumping of lasers,” vol. 7, nº 43, 2004.
- [16] B. Couto, D. Liang e J. Almeida, “Optical fibler pumping of solar Nd:YAG disk laser,” *SPIE*, 2011.
- [17] R. Paschotta, Thin disk laser: Encyclopedia of Laser Physics and Technology.
- [18] A. Giesen e J. Speiser, “Fifteen years of wordk on thin-disk lasers: results and scaling laws,” *Top. Quantum Electron*, vol. 3, nº 13, pp. 598-609, 2007.
- [19] J. Geusic, H. M. Marcos e L. G. Van Uitert, “Crystalline Solid Lasers,” vol. 4, nº 10, 182.
- [20] M. Weckslar e J. Shwartz, “Solar pumped solid-state laser,” *IEEE J. of Quant. Elect*, vol. 24, nº 6, pp. 1222-1228, 1988.

- [21] M. Lando, J. Kagan, B. Linyekin e V. Dobrusin, "A solar pumped Nd:YAG laser in the high collection efficiency regime," *Opt. Commun.*, n° 222, pp. 371-381, 2003.
- [22] D. Liang e J. Almeida, "Highly efficient solar pumped Nd:YAG laser," *Opt. Express* 19, 2011.
- [23] J. Almeida, D. Liang e E. Guillot, "Improvement in solar-pumped Nd:YAG laser beam brightness," *Opt. Laser Technol.*, n° 44, pp. 2115-2119, 2012.
- [24] T. Yabe, T. Ohkubo, S. Uchida, M. Nakatsuka, T. Funatsu, A. Mabuti, A. Oyama, Y. Nakagawa, T. Oishi, K. Daito, B. Behgol, Y. Nakayama, M. Yoshida, S. Motokoshi, Y. Sato e C. Baasandash, "High efficiency and economical solar energy pumped laser with Fresnel lens and cerium co-doped laser medium," *Appl. Phys Lett.*, n° 90, 2007.
- [25] T. H. Dinh, T. Ohkubo, T. Yabe e H. Kuboyama, "120 watt continuous wave solar-pumped laser with a liquid light-guide lens and a Nd:YAG rod," *Opt. Lett.*, n° 37, pp. 2670-26672, 2012.

## Capítulo 9. ANEXO

### Anexo 1 – Parametrização do Espectro Solar no Zemax.

Wavelength Data

Use	Wavelength (micrometers)	Weight	Use	Wavelength (micrometers)	Weight
<input checked="" type="checkbox"/> 1	0.35000000	0.33	<input checked="" type="checkbox"/> 13	1.55000000	0.26
<input checked="" type="checkbox"/> 2	0.45000000	1.24	<input checked="" type="checkbox"/> 14	1.65000000	0.22
<input checked="" type="checkbox"/> 3	0.55000000	1.39	<input checked="" type="checkbox"/> 15	1.75000000	0.15
<input checked="" type="checkbox"/> 4	0.65000000	1.27	<input checked="" type="checkbox"/> 16	1.85000000	0.001
<input checked="" type="checkbox"/> 5	0.75000000	0.89	<input checked="" type="checkbox"/> 17	1.95000000	0.001
<input checked="" type="checkbox"/> 6	0.85000000	0.91	<input checked="" type="checkbox"/> 18	2.05000000	0.067
<input checked="" type="checkbox"/> 7	0.95000000	0.26	<input checked="" type="checkbox"/> 19	2.15000000	0.1
<input checked="" type="checkbox"/> 8	1.05000000	0.61	<input checked="" type="checkbox"/> 20	2.25000000	0.1
<input checked="" type="checkbox"/> 9	1.15000000	0.14	<input checked="" type="checkbox"/> 21	2.35000000	0.1
<input checked="" type="checkbox"/> 10	1.25000000	0.44	<input checked="" type="checkbox"/> 22	2.45000000	0.001
<input checked="" type="checkbox"/> 11	1.35000000	0.0046	<input type="checkbox"/> 23	0.55000000	1
<input checked="" type="checkbox"/> 12	1.45000000	0.06	<input type="checkbox"/> 24	0.55000000	1

Select > F, d, C (Visible) Primary: 1

OK Cancel Sort  
Help Save Load

### Anexo 2 – Índices de transmissão do material PMMA usado nas lentes de Fresnel.

Transmission Data

Glass: PMMA

Num	Lambda	Trans	Thick
1	0.334000	1.000000	25.000000
2	0.350000	1.000000	25.000000
3	0.365000	1.000000	25.000000
4	0.370000	1.000000	25.000000
5	0.380000	1.000000	25.000000
6	0.390000	1.000000	25.000000
7	0.400000	1.000000	25.000000

Scroll Up Page Up Save Catalog  
Scroll Dn Page Dn Exit  
Save To File Load From File

Transmission Data

Glass: PMMA

Num	Lambda	Trans	Thick
8	0.420000	1.000000	25.000000
9	0.460000	1.000000	25.000000
10	0.500000	1.000000	25.000000
11	0.660000	1.000000	25.000000
12	1.060000	1.000000	25.000000
13	1.529000	1.000000	25.000000
14	2.325000	1.000000	25.000000

Scroll Up Page Up Save Catalog  
Scroll Dn Page Dn Exit  
Save To File Load From File

### Anexo 3 – Índices de transmissão do material SILICA usado no concentrador secundário.

Transmission Data

Glass: SILICA

Num	Lambda	Trans	Thick
1	0.334000	1.000000	25.000000
2	0.350000	1.000000	25.000000
3	0.365000	1.000000	25.000000
4	0.370000	1.000000	25.000000
5	0.380000	1.000000	25.000000
6	0.390000	1.000000	25.000000
7	0.400000	1.000000	25.000000

Scroll Up Page Up Save Catalog  
Scroll Dn Page Dn Exit  
Save To File Load From File

Transmission Data

Glass: SILICA

Num	Lambda	Trans	Thick
8	0.420000	1.000000	25.000000
9	0.460000	1.000000	25.000000
10	0.500000	1.000000	25.000000
11	0.660000	1.000000	25.000000
12	1.060000	1.000000	25.000000
13	1.529000	1.000000	25.000000
14	2.325000	1.000000	25.000000

Scroll Up Page Up Save Catalog  
Scroll Dn Page Dn Exit  
Save To File Load From File

**Anexo 4 - Parametrização da absorção do ND:YAG no Zemax.**

Wavelength Data

Use	Wavelength (micrometers)	Weight	Use	Wavelength (micrometers)	Weight
<input checked="" type="checkbox"/> 1	0.52700000	65	<input checked="" type="checkbox"/> 13	0.79000000	67
<input checked="" type="checkbox"/> 2	0.53100000	70	<input checked="" type="checkbox"/> 14	0.79300000	66
<input checked="" type="checkbox"/> 3	0.56800000	82	<input checked="" type="checkbox"/> 15	0.80300000	65
<input checked="" type="checkbox"/> 4	0.57800000	87	<input checked="" type="checkbox"/> 16	0.80500000	64
<input checked="" type="checkbox"/> 5	0.58600000	88	<input checked="" type="checkbox"/> 17	0.80800000	63
<input checked="" type="checkbox"/> 6	0.59200000	88	<input checked="" type="checkbox"/> 18	0.81100000	62
<input checked="" type="checkbox"/> 7	0.73200000	81	<input checked="" type="checkbox"/> 19	0.81500000	61
<input checked="" type="checkbox"/> 8	0.73600000	80	<input checked="" type="checkbox"/> 20	0.82000000	60
<input checked="" type="checkbox"/> 9	0.74300000	80	<input checked="" type="checkbox"/> 21	0.86500000	49
<input checked="" type="checkbox"/> 10	0.74600000	78	<input checked="" type="checkbox"/> 22	0.88000000	46
<input checked="" type="checkbox"/> 11	0.75300000	77	<input type="checkbox"/> 23	0.55000000	1
<input checked="" type="checkbox"/> 12	0.75800000	76	<input type="checkbox"/> 24	0.55000000	1

Select -> F, d, C (Visible) Primary: 1

OK Cancel Sort  
Help Save Load

## Anexo 5 – Artigo aceite no RIAO-OPTILAS 2013

Please verify that (1) all pages are present, (2) all figures are correct, (3) all fonts and special characters are correct, and (4) all text and figures fit within the red margin lines shown on this review document. Complete formatting information is available at <http://SPIE.org/manuscripts>

Return to the Manage Active Submissions page at <http://spie.org/app/submissions/tasks.aspx> and approve or disapprove this submission. Your manuscript will not be published without this approval. Please contact [author\\_help@spie.org](mailto:author_help@spie.org) with any questions or concerns.

### Core-doped Nd:YAG disk solar laser uniformly pumped by six Fresnel lenses

D. Garcia, D. Liang\* and J. Almeida

CEFITEC, Departamento de Fisica, FCT, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516,  
Campus de Caparica, Portugal

[dm.garcia@campus.fct.unl.pt](mailto:dm.garcia@campus.fct.unl.pt), [\\*dl@fct.unl.pt](mailto:*dl@fct.unl.pt), [jla@campus.fct.unl.pt](mailto:jla@campus.fct.unl.pt)

#### Abstract

A novel solar laser uniformly pumped by six Fresnel lenses is proposed here. The incident solar radiation is firstly collected and concentrated by six 0.8 m diameter Fresnel lenses and then reflected by other six plane mirrors to a central focal zone, where a laser head is mounted. About 2.5 kW solar power with 3.5 W/mm<sup>2</sup> peak solar flux can be achieved in the focal zone. The laser head is composed of a fused silica six-sphere type secondary concentrator that further compresses the concentrated solar power from the six Fresnel lenses-plane mirrors to a core-doped YAG Nd<sup>3+</sup>:YAG ceramic disk. Optimum pumping parameters and solar laser output powers are found through ZEMAX non-sequential ray-tracing and LASCAD laser cavity analysis, respectively. The laser resonant cavity is formed by a PR 1064 nm output coupler and a HR 1064 nm plane reflector. An 8 mm diameter central hole is drilled through the six-sphere type concentrator to allow the extraction of laser power from the disk. Since only 16 % of the useful solar power is absorbed by the Nd:YAG medium, for 950 W/m<sup>2</sup> of terrestrial solar irradiation, the effective solar pump power of 456 W is assumed in ray-tracing analysis. 72.2 W of multimode laser power is predicted for an 8 mm diameter gain medium embedded within a conical undoped YAG cladding, reaching the collection efficiency of 24.1 W/m<sup>2</sup>.  $M^2 = 16.6$  is numerically calculated, corresponding to the brightness figure of merit of 0.26 W. A near uniform absorbed pump profile is achieved.

**Keywords:** Solar-pumped lasers, Nd:YAG, laser beam, beam profile, Fresnel lens, core-doped

#### 1. Introduction

Solar-pumped lasers have gained an ever increasing importance in recent years [1]. Compared to electrically powered lasers, solar lasers are much simpler and reliable due to the complete elimination of the electrical power generation and power conditioning equipment. Nevertheless, additional focusing systems are usually required to collect solar radiation because natural sunlight does not provide power density sufficient enough to produce laser.

The first solid-state solar-pumped laser has been reported by Young in 1966 [2]. Since then, researchers have been exploiting parabolic mirrors and Fresnel lenses to attain enough concentrated solar radiation at focal point, and several pumping schemes have been proposed for enhancing solar laser output performance [3-7]. The progress with Fresnel lenses and chromium co-doped Cr:Nd:YAG ceramic laser medium [8] has revitalized solar laser researches. 19.3 W/m<sup>2</sup> collection efficiency has been reported in 2011 [5] by utilizing an economical Fresnel lens and the most widely used Nd:YAG single-crystal rod. Most recently, record-high Nd:YAG solar laser collection efficiency of 30.0 W/m<sup>2</sup> has been achieved [9] through a Fresnel lens scheme. Despite the strong desire to achieve high collection efficiency, much more attentions should also be paid to the solar laser beam quality in order to attain tight focusing, which is very important for most laser applications.

The thin-disk laser concept, initially developed for diode-pumped laser systems [10, 11], is one of the most suitable approaches when high power, high efficiency and good beam quality are required simultaneously. Due to small volume-to-surface-area ratio, the gain medium can be cooled very efficiently. The direction of the heat flow is hence mainly parallel to the laser cavity axis, which in combination with short optical path length through the active medium, results in a reduction of the thermal lensing effect and thermally induced aberrations by orders of magnitude compared to typical high-power rod lasers. Typical thin disk laser systems use a nearly end-pumped geometry, however, the small absorption

RIA100 - 682 V. 1 (p.1 of 7) / Color: No / Format: A4 / Date: 5/15/2013 8:53:30 AM

SPIE USE: \_\_\_\_ DB Check, \_\_\_\_ Prod Check, Notes:



distance inside the active medium yields poor absorption. A solution to this problem has been proposed by Dascalu *et al.* [12], consisting of a laser disc diffusion bonded to an un-doped YAG cap of larger dimensions. The pump beams are delivered across three windows cut obliquely on the pumping surface of the un-doped YAG medium. The incoming light rays then propagate inside the un-doped cap and the gain medium through total internal reflection. This configuration allows the multi-pass pumping through the gain medium, providing a way to concentrate the pump light uniformly into a smaller diameter disk. The integration of this approach to solar lasers through optical fiber pumping has been proposed [13] for the alleviation of the thermal management problems that has plagued the present-day solar-pumped lasers. Nevertheless, this solar pumping scheme requires a large number of optical fibers and small primary collectors, resulting in the collection efficiency of  $5.9 \text{ W/m}^2$ .

To attain both high solar laser collection efficiency and high quality solar laser beam, a new solar pumping approach is here proposed for efficient side-pumping of the core-doped YAG Nd:YAG disk. Core-doped ceramic mediums are laser active in the Nd-doped core only, and bonded with the same host material either un-doped or doped with a different element that effectively absorbs light at the signal wavelength. Since the medium cross-section is widened by the cladding, wider Gaussian intensity distributions can be accommodated in the laser active region without truncating its wings. The negative impact of diffraction on the laser beam quality can hence be reduced [14].

Solar energy collection and concentration is achieved through the combination of six Fresnel lenses - plane mirrors. The concentrated solar radiation is then focused to the lateral face of the disk through the six fused silica sphere type concentrator. Optimum pumping conditions and solar laser beam parameters are found through ZEMAX and LASCAD numerical analysis, respectively, for different core-doped Nd:YAG ceramic disks with different cladding slope angles. The production of  $72.2 \text{ W}$  multimode laser power is expected with an  $8 \text{ mm}$  diameter,  $6 \text{ mm}$  thickness Nd:YAG gain media embedded within a  $34^\circ$  slope angle YAG cladding. High solar laser collection efficiency of  $24.1 \text{ W/m}^2$  is hence achieved. Beam quality factor  $M^2 = 16.6$  is numerically attained in this case, resulting in the brightness figure of merit of  $0.26 \text{ W}$ , which approaches the record value for Nd:YAG solar laser.

## 2. Solar pumping approach for core-doped Nd:YAG disk laser

### 2.1 Solar energy collection and concentration through the six Fresnel lenses-plane mirrors system

The solar-pumped disk laser scheme in Fig 1 (a) is formed by a combination of 6 pairs of circular Fresnel lenses and plane mirrors for edge-pumping of the core-doped ceramic Nd:YAG disk. Solar tracking can be achieved by mounting the whole laser system onto a two axis-heliostat that follows the Sun continuously in direct tracking mode. The incoming solar radiation is firstly collected and concentrated by the Fresnel lenses. They are evenly distributed along an  $800 \text{ mm}$  radius virtual circumference, which center is located  $370 \text{ mm}$  below the center of the laser head, as shown in Fig. 2. To both reflect and concentrate the solar rays onto the laser head, each plane mirror is then placed  $710 \text{ mm}$  below the corresponding Fresnel lens, with a  $74^\circ$  inclination in relation to their common optical axis.

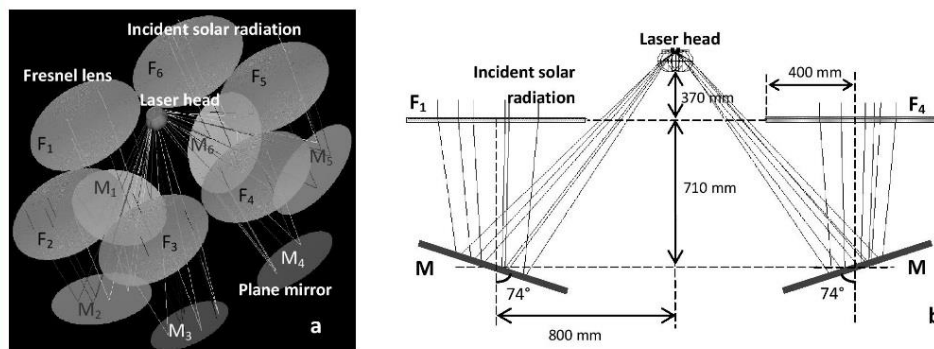


Fig 1. (a) Six Fresnel lens - plane mirrors pumping approach for core - doped disk laser (b) Cross - section side view of the solar light collection and concentration system.

SPIE USE: ☐ DB Check, ☐ Prod Check, Notes:



Each Fresnel lens has 0.4 m radius and 2.2 m focal length. It is made of Polymethyl Methacrylate (PMMA) material, which is transparent at visible and near infrared wavelengths, but absorbs the infrared radiation beyond 2200 nm and cut undesirable UV solar radiation below 350 nm. An averaged transmission efficiency of 90 % is numerically calculated for each Fresnel lens. Considering 98 % reflectivity for each plane mirror and the terrestrial solar irradiation of  $950 \text{ W/m}^2$ , about 2.5 kW solar power with  $3.5 \text{ W/mm}^2$  peak flux can be achieved in the focal zone. This value can be improved to  $9 \text{ W/mm}^2$  with the fused silica six spheres type secondary concentrator, in Fig. 2 (a), which minimizes the focal spot and compresses the concentrated solar radiation from the six Fresnel lenses-plane mirrors to the laser disk.

## 2.2 The core-doped Nd:YAG laser head

As shown Fig. 2 (b), the secondary concentrator is formed by the union of six fused silica spheres, with 50 mm diameter. The formation has a six-fold symmetry, in which the center of each sphere is placed 31 mm away from the center of the concentrator. This geometry allows the more efficient compression of the pump light from each Fresnel lens-plane mirror.

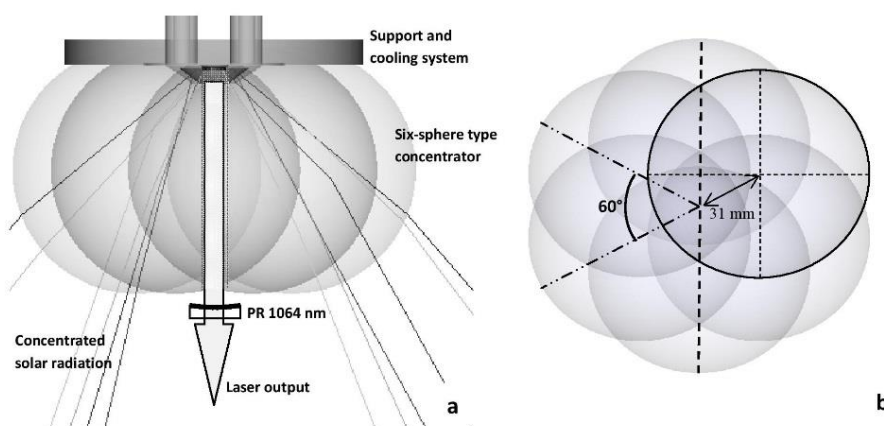


Fig 2. (a) The fused silica six-sphere type second stage concentrator. (b) Detailed view of the union of six-spheres.

Fused silica is an ideal optical material for Nd:YAG laser pumping since it is transparent over the Nd:YAG absorption spectrum. It has a high softening point and is resistant to scratching and thermal shock. The fused silica material is also important in preventing the possible heating of ultra-high solar flux at the focus to the mechanical structure of the laser head. High optical quality ( 99.999 % ) concentrators can be manufactured by optical machining and polishing. A conical hole is drilled in the concentrator for the installation of the conical core-doped laser disk, as shown in Fig. 3. Both upper and lateral faces of the disk are directly cooled by water, whereas the lower surface is fixed to the concentrator with optical glue. The cooled upper surface of the gain medium is HR 1064 nm coated, whereas the lower surface is AR 1064 nm coated. A central hole is drilled along the six-sphere type concentrator to allow the extraction of laser power. The laser resonant cavity is hence formed by both the HR 1064 nm coating and the output coupler, as shown in both Fig. 2 (a) and Fig. 3.

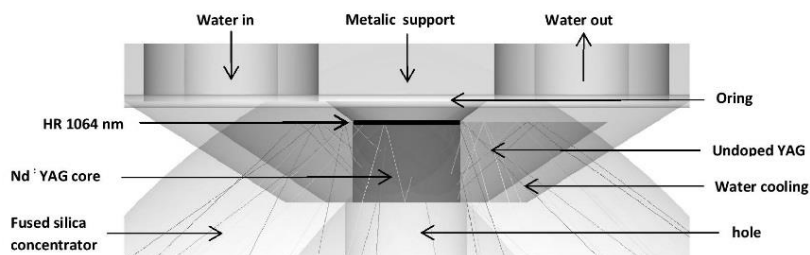


Fig 3. Cooling system and mechanical support of the core-doped Nd:YAG laser head.

With this new configuration, the concentrated pump light from each Fresnel lens-plane mirror is delivered across the oblique lateral surface of the un-doped YAG element,  $60^\circ$  apart from each other, as illustrated in Fig.4 (b). The pumping rays then propagate inside the core-doped disk through total internal reflection. This enables a multi-pass pumping inside the disk, improving both the absorbed pump power and absorbed pumped distribution within the smaller diameter gain medium, providing a way to concentrate the pump beam uniformly into a smaller diameter medium.

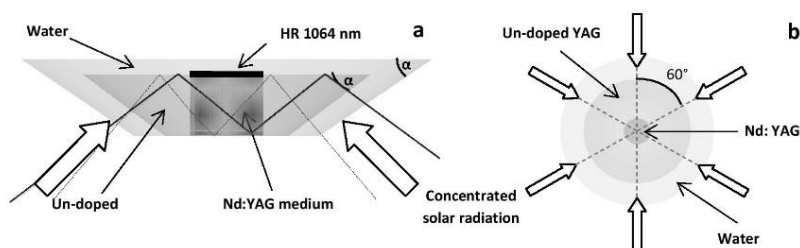


Fig 4. Pump light concentration and propagation through the conical core-doped YAG Nd:YAG laser disk: (a) Cross-sectional side view and (b) top view.

### 3. Numerical analysis of solar laser performances with core-doped Nd:YAG disks

Optimum pumping parameters for the whole optical system are found through ZEMAX non-sequential ray-tracing with merit function optimization. The standard solar spectrum for one-and-a-half air mass (AM1.5) [15] is used as the reference data for consulting the spectral irradiance ( $W/m^2/nm$ ) at each wavelength. Taking into account the 16 % overlap between the solar spectrum and the Nd:YAG medium absorption spectrum [16], the effective solar pump power of 456 W is assumed in ZEMAX non-sequential ray-tracing analysis. The solar half-angle divergence of  $0.27^\circ$  is also considered. The absorption spectrum of all materials is included in ZEMAX numerical data to account for absorption losses.

Nd:YAG is the most-widely used solid-state laser material and is a promising candidate in high-power thin-disk lasers. It has been demonstrated as the best material under solar pumping because of its superior characteristic on thermal conductivity, high quantum efficiency and mechanical strength compared to other host materials [2-5, 7]. For 1.1 % Nd:YAG laser medium, 22 absorption peaks are defined in ZEMAX numerical data [3-5]. All the peak wavelengths and their respective absorption coefficients are added to the glass catalogue for Nd:YAG material in ZEMAX software. Solar irradiance values for the above-mentioned 22 peak absorption wavelengths could be consulted from the standard solar spectra for AM1.5 and saved as source wavelength data. In ray-tracing, the laser disk is divided into a total of 18000 zones. The path length in each zone is found. With this value and the effective absorption coefficient of 1.1 % Nd:YAG

material, the absorbed power within the laser medium can be calculated by summing up the absorbed pump radiation of all zones. The absorbed pump flux data from the ZEMAX analysis is then processed by LASCAD software to study the laser performance. All the technical parameters and data used in both ZEMAX and LASCAD numerical analysis have already been confirmed by our previous experimental results [3-5].

In LASCAD analysis the optical resonator is comprised of two opposing parallel mirrors at right angles to the axis of the laser disk. The amount of feedback is determined by the reflectivity of the mirrors. One end mirror is high reflection coated (HR, 99.98 %) and corresponds to the HR-coated surface of the disk. The output coupler is partial reflection coated (PR) with reflectivity variable between 90 - 99 %, according to different disk diameters.

For correct parameterization of the laser system, the laser output powers of core-doped disks with different gain medium diameters ( $D_{Nd:YAG}$ ) are studied as function of the cladding slope angle ( $\alpha$ ). The core-doped disk thickness is maintained at 6 mm for all cases. A 400 mm length resonator is chosen in LASCAD software. The radius of curvature of the output coupler  $RoC = 5$  m is assumed in the analysis.

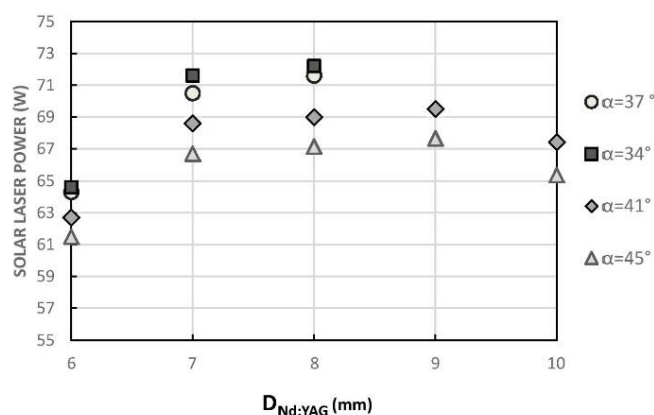


Fig 5. Calculated multimode solar laser power output for different doped core diameters ( $D_{Nd:YAG}$ ) as the function of the cladding slope angle ( $\alpha$ ).

The cladding slope angle of  $34^\circ$  allows more absorbed pumped power within the gain medium, resulting in higher multimode laser power compared to other angles, as given in Fig. 5. The maximum laser output power of 72.2 W is numerically achieved with the  $D_{Nd:YAG} = 8$  mm, resulting in high collection efficiency of  $24.1 \text{ W/m}^2$ .  $M^2 = 16.6$  are numerically calculated in these case, resulting in the brightness figure of merit of 0.26 W, which approaches the record value for Nd:YAG solar laser. Due to mechanics confinement, the core-doped disks with  $D_{Nd:YAG}$  higher than 8 mm cannot be numerically calculated for the slope angles minor than  $40^\circ$ . In these cases,  $\alpha = 41^\circ$  offers the best option to attain maximum laser power.

The grey-scale absorbed pump flux distribution within the central cross-sections of the  $D_{Nd:YAG} = 8$  mm core-doped disk with  $34^\circ$  cladding slope angle is shown in Fig. 6. Black color means near maximum pump absorption for these plots, whereas white means little or no absorption. A near uniform profile is achieved, which contributes largely to the reduction of the laser beam divergence and thermal loading problems.



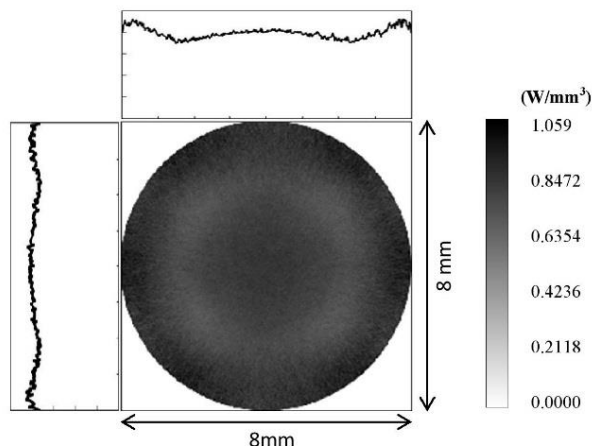


Fig 5. Absorbed pump flux distribution along the central cross-section of the 8 mm diameter Nd:YAG core.

#### 4. Conclusions

Based on thin-disk laser technology and on our experience in solar-pumped solid-state lasers, an alternative six Fresnel lenses - plane mirrors approach is here proposed for the efficient side-pumping of the conical core-doped YAG Nd:YAG ceramic disk. In addition to the high concentration capacity of the fused silica six sphere type secondary concentrator, 72.2 W solar laser power can be achieved by the 34° slope angle core-doped disk with 8 mm diameter doped core, corresponding to high collection efficiency of 24.1 W/m<sup>2</sup>. A brightness figure of merit of 0.26 W is expected in this case. A near uniform absorbed pump flux distribution is achieved. The proposed solar pumping scheme presents therefore a good compromise between laser power and beam quality.

#### Acknowledgments

These research projects (PTDC/FIS/103599/2008 and PTDC/FIS/122420/2010) were funded by the Science and Technology Foundation of Portuguese Ministry of Science, Technology and Higher Education (FCT-MCTES).

#### References

- [1] Graham-Rowe, D., "Solar-powered laser," Nat. Photonics 4, 64-65 (2010).
- [2] Young, C. G., "A sun pumped cw one-watt laser," Appl. Opt. 5(6), 993-997, (1966).
- [3] Weksler, M. and Schwartz, J., "Solar-pumped solid-state lasers," IEEE J. Quantum Electron. 24(6), 1222-1228 (1988).
- [4] Lando, M., Kagan, J., Linyekin, B. and Dobrusin, V., "A solar pumped Nd:YAG laser in the high collection efficiency regime," Opt. Commun. 222(1-6), 371-381 (2003).
- [5] Liang, D. and Almeida, J., "Highly efficient solar pumped Nd:YAG laser," Opt. Express 19(27), 26399-26405 (2011).

- [6] Almeida, J., Liang, D. and Guillot, E., "Improvement in solar-pumped Nd:YAG laser beam brightness," *Opt. Laser Technol.* 44(7), 2115-2119 (2012).
- [7] Almeida, J., Liang, D., Guillot, E. and Abdel-Hadi, Y., "A 40 W cw Nd:YAG solar laser pumped through a heliostat : a parabolic mirror system," *Laser Phys.* 23 (2013) 065801.
- [8] Yabe, T., Ohkubo, T., Uchida, S., Nakatsuka, M., Funatsu, T., Mabuti, A., Oyama, A., Nakagawa, Y., Oishi, T., Daito, K., Behgol, B., Nakayama, Y., Yoshida, M., Motokoshi, S., Sato, Y. and Baasandash, C., "High efficiency and economical solar energy pumped laser with Fresnel lens and chromium co-doped laser medium," *Appl. Phys. Lett.* 90(26), 261120-3 (2007).
- [9] Dinh, T. H., Ohkubo, T., Yabe, T. and Kuboyama, H., "120 watt continuous wave solar-pumped laser with a liquid light-guide lens and a Nd:YAG rod," *Opt. Lett.* 37(13), 2670-2672 (2012).
- [10] Giesen, A., Hügel H., Voss A., Wittig, K., Brauch, U. and Opower, H., "Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers," *Appl. Phys. B* 58(5), 365-372 (1994).
- [11] Giesen, A. and Speiser, J., "Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 13 (3), 598-609 (2007).
- [12] Dasalu T. and Taira T., "Highly efficient configuration for microchip solid-state laser," *Opt. Express* 4(2), 670-677 (2006).
- [13] Couto, B. and Liang, D., "Optical fiber pumping of solar Nd:YAG disc laser," *Proc. SPIE* 8001, 80014D (2011).
- [14] Sträßer, A., Ostermeyer, M., "Improving the brightness of side pumped power amplifiers by using core-doped ceramic rods," *Opt. Express* 14 (15), 6687-6693 (2006).
- [15] ASTM Standard G173 (2012).
- [16] Zhao, B., Zhao, C., He, J. and Yang, S., "The Study of Active Medium for Solar-Pumped Solid-State Lasers," *Acta Opt. Sin.* 2007 (10), 1-9 (2006).

## Comparative study of Nd:YAG solar laser performance in end-pumping and side-pumping configurations

J. Almeida, D. Liang, D. Garcia

CEFITEC, Departamento de Física, FCT, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516, Campus de Caparica, Portugal

Solar-pumped solid-state lasers are promising for many applications. Since the report of the first sun-pumped solid-state laser [1], several pumping schemes have been proposed for enhancing the solar laser performance. Although the most efficient laser systems have end-pumping approaches, side-pumping configurations are very suitable for laser power scaling [2]. Here we report experimental comparisons between the performances of Nd:YAG solar lasers by using either end-pumping or side-pumping techniques.

A heliostat-parabolic mirror system redirects, collects and concentrates the incoming solar radiation to the 15 mm diameter focal spot of a 2.88 m<sup>2</sup> parabolic mirror. About 1800 W solar power is highly concentrated. In end-pumping configuration, a conical-shaped fused silica light-guide with 3D-CPC output end is used to transmit, compress the concentrated solar radiation from the focal zone of the parabolic mirror into a 5 mm diameter, 25 mm length Nd:YAG rod, within a conical pump cavity, which enables the multi-pass pumping through the laser rod, as shown in Fig.1 (a). In side-pumping configuration, a fused silica light-guide with rectangular cross-section is used to collect nearly the same concentrated solar power from the focal zone. The guide also acts as a beam homogenizer by transforming the near-Gaussian profile of the concentrated light spot, incident on its input face, into a uniform rectangular light distribution at its output end, as illustrated in Fig. 1(b). A 2D-CPC cavity is employed in this approach to enhance both the absorbed pump power and distribution along a 4 mm diameter, 30 mm length Nd:YAG rod. Uniform absorption along the rod is achieved, reducing the thermal loading problems [3].

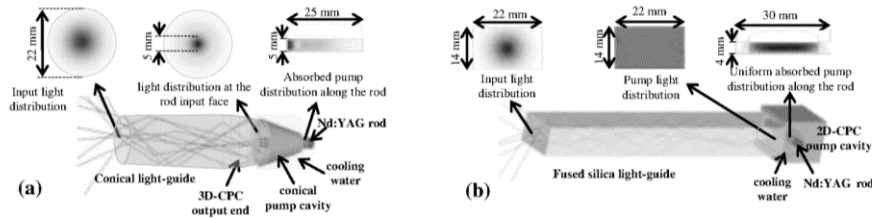


Fig. 1 (a) End-pumping and (b) side-pumping configurations, optimized through ZEMAX® and LASCAD® numerical analysis.

For 990W/m<sup>2</sup> solar irradiance in Odeillo, France, the maximum solar laser power of 40.1 W is produced by the end-pumping configuration, corresponding to 45% enhancement over the collection efficiency of side-pumping configuration [3], as indicated by both Fig. 2 and Table 1. The end-pumping configuration provides simultaneously the highest slope efficiency and the lowest threshold pump power. However, the side-pumping approach is very much preferred for attaining high quality laser beam. The best beam quality factors of  $M_x^2=8.9$  and  $M_y^2=9.6$  are measured in this approach. High brightness figure of merit B of 0.29 W is therefore attained, which is, to the best of our knowledge, the highest solar laser brightness figure of merit ever reported.

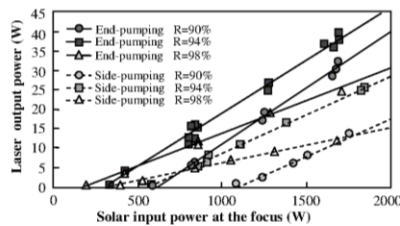


Fig. 2 Solar input/ laser output performance.

Table 1- Experimental measurements of the Nd:YAG solar laser output performances

Configuration	End-pumping	Side-pumping
Maximum laser power (W)	40.1	27.7
Collection efficiency (W/m <sup>2</sup> )	13.9	9.6
Maximum slope efficiency (%)	2.9	2.2
Minimum threshold pump power (W)	192	402
Best M <sup>2</sup> factors (M <sub>x</sub> <sup>2</sup> /M <sub>y</sub> <sup>2</sup> )	13.3/13.4	8.9/9.6
Maximum figure of merit B (W)	0.14	0.29

### References

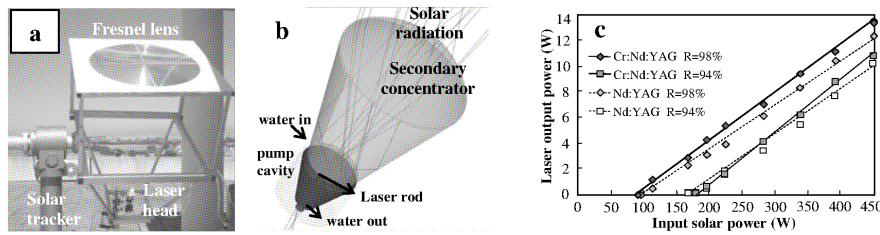
- [1] C. G. Young, "A sun-pumped cw one-watt laser," Appl. Opt. **5**, 993 (1966).
- [2] M. Lando, J. Kagan, B. Linyekin, and V. Dobrusin, "A solar-pumped Nd:YAG laser in the high collection efficiency regime," Opt. Commun. **222**, 371 (2003).
- [3] J. Almeida, D. Liang, and E. Guillot, "Improvement in solar-pumped Nd:YAG laser beam brightness," Opt. Laser Tech **44**, 2115 (2012).

## Comparative study of Cr:Nd:YAG and Nd:YAG solar laser performances

D. Liang, J. Almeida, D. Garcia

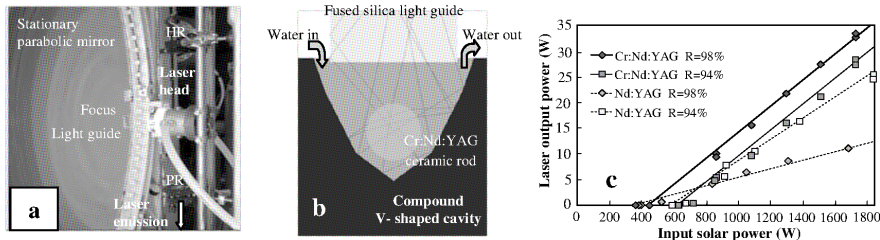
CEFITEC, Departamento de Física, FCT, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516, Campus de Caparica, Portugal

To improve the efficiency of Nd<sup>3+</sup>-doped YAG solar laser, cross-pumped Cr<sup>3+</sup> and Nd<sup>3+</sup> co-doped YAG ceramic material has attracted more attentions in recent years [1]. The sensitizer Cr<sup>3+</sup> ions have broad absorption bands in the visible region. Despite the interests in Cr:Nd:YAG ceramic medium, researchers have achieved significant laser efficiencies with different Nd:YAG single-crystal rods. While it is clear about the effectiveness of Nd:YAG single-crystal rods for solar laser operation, there still exist some concerns about the advantages of Cr:Nd:YAG ceramics in solar-pumped lasers.



**Fig. 1** (a) Solar laser system with a Fresnel lens. (b) The concentrator is coupled to the conical cavity where the laser rod is efficiently pumped. (c) Cr:Nd:YAG and Nd:YAG laser output powers versus input solar power at the focus of the Fresnel lens.

A 0.9 m diameter Fresnel lens is used as an economical solar collector, as shown in Fig.1a. A 4 mm diameter, 25 mm length 1.0 at% Nd:YAG single-crystal rod [2] and a 0.1 at% Cr: 1.0 at% Nd:YAG ceramic rod are pumped alternatively within the conical cavity through a secondary concentrator, as shown in Fig.1b. With the Nd:YAG rod, the maximum laser power is 12.3 W, corresponding to 19.3 W/m<sup>2</sup> collection efficiency. With the Cr:Nd:YAG ceramic rod, the maximum laser power is 13.4 W, corresponding to 21.0 W/m<sup>2</sup> collection efficiency. This result is, to the best of our knowledge, the highest collection efficiency achieved with Cr:Nd:YAG ceramic medium. There is also a 109% increase in slope efficiency, as indicated by Fig. 1c.



**Fig. 2** (a) Solar laser system with a parabolic mirror. (b) Side-view of the compound V-shaped pump cavity. (c) Cr:Nd:YAG ceramic and Nd:YAG single-crystal laser output powers versus input solar power at the focus of the parabolic mirror.

A 2.0 m diameter parabolic mirror is also used as a powerful solar collector, as shown in Fig.2a. A 7 mm diameter, 30 mm length, 0.1 at% Cr: 1.0 at% Nd:YAG ceramic rod is pumped within a compound V-shaped cavity through a fused silica light guide with rectangular cross-section, as shown in Fig.2b. With the Cr:Nd:YAG ceramic rod, the maximum laser power is 33.6 W, corresponding to 121% enhancement over our previous solar laser power with 4 mm diameter, 30 mm length Nd:YAG single-crystal rod, pumped through the same parabolic mirror [3]. There is also 118% increase in slope efficiency, as indicated in Fig.2c. In summary, we have experimentally observed a moderate, but not significant, advantage of Cr:Nd:YAG ceramics over Nd:YAG single-crystal medium in both solar laser conversion and slope efficiency.

### References

- [1] T. Saiki, S. Motokoshi, K. Imasaki, H. Fujita, M. Nakatsuka and C. Yamanaka, "Nd/Cr:YAG ceramic rod laser pumped using arc-metal-halide-lamp," Jpn. J. Appl. Phys. **46**, 156 (2007).
- [2] D. Liang and J. Almeida, "Highly efficient solar-pumped Nd:YAG laser," Opt. Express **19**, 26399 (2011).
- [3] J. Almeida, D. Liang, and E. Guillot, "Improvement in solar-pumped Nd:YAG laser beam brightness," Opt. Laser Tech **44**, 2115 (2012).